

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID

Facultad de Filosofía y Letras

Departamento de Lingüística, Lenguas Modernas, Lógica y Filosofía de la Ciencia

**ORIGEN E IMPLICACIONES FILOSÓFICAS DE LAS MEDIDAS
CUÁNTICAS SIN INTERACCIÓN.**

LA FILOSOFÍA DE LA FÍSICA DE M.RENNINGER

Tesis doctoral presentada por:

Josefa Castellà Cid

Dirigida por:

Karim Gherab Martín

A mi marido y a mis hijos

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero expresar mi agradecimiento a Karim Gherab Martín por la confianza que ha depositado en mí desde el principio, por el entusiasmo y la dedicación que ha mostrado en este proyecto, por sus orientaciones y sugerencias, que han sido para mí una fuente de inspiración, y por transmitirme el valor del rigor en la investigación.

En segundo lugar, agradezco a Finn Aaresud y su equipo la acogida que me dispensaron y el material bibliográfico que me ofrecieron en mi visita al Archivo del Instituto Bohr de Copenhague. Agradezco también a Willy De Baere, de la Universidad de Gent, la atención con que respondió a todas mis cuestiones y la información que me aportó sobre Renninger.

Finalmente, agradezco a mi marido, mis hijos y mis amigos su apoyo constante e incondicional, sin el cual esta investigación no se hubiera podido realizar; por ello, este trabajo es también el suyo.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	9
---------------------------	---

PRIMERA PARTE. Contexto en el que surgen las medidas sin interacción de Renninger

CAPÍTULO 1. La concepción filosófica de Bohr	60
Índice del capítulo.....	60
1 Introducción del capítulo.....	62
2 La lección epistemológica que ofrece la teoría cuántica.....	62
3 El lenguaje.....	63
4 Aportación científica.....	67
4.1 Primeros trabajos científicos.....	68
4.2 La estructura del átomo.....	69
5 El principio de correspondencia.....	74
6 La complementariedad.....	80
6.1 El camino de Bohr hacia la complementariedad.....	80
6.2 Aparición de la noción de complementariedad.....	80
6.3 La conferencia de Como.....	92
6.4 La noción de complementariedad más allá de la física.....	95
6.5 Pensamiento dialéctico.....	101
6.6 Visión crítica.....	103
7 Precedentes.....	105
7.1 Møller.....	105
7.2 James.....	107
7.3 Høffding.....	110
8 El debate Bohr-Einstein.....	116
8.1 Oposición entre Bohr y Einstein.....	116
8.2 Conflicto de <i>themata</i>	125
9 Elementos kantianos en el pensamiento de Bohr.....	127
10 La concepción ontológica de Bohr.....	130
10.1 Elementos realistas.....	131
10.2 Elementos antirealistas.....	133

11	Conclusión del capítulo.....	136
CAPÍTULO 2. La concepción filosófica de Heisenberg.....		
	Índice del capítulo.....	139
1	Introducción del capítulo.....	140
2	La mecánica de matrices.....	141
2.1	Situación general de la física atómica de la época.....	141
2.2	Los osciladores virtuales.....	143
2.3	El nacimiento de la mecánica de matrices.....	144
3	Las relaciones de indeterminación.....	150
3.1	Circunstancias en las que fueron derivadas las relaciones de indeterminación..	150
3.2	Derivación de las relaciones de indeterminación.....	153
3.3	El problema de la falta de <i>Anschaulichkeit</i> 1.....	156
3.4	Respuesta de Bohr.....	157
4	Interpretaciones de las relaciones de indeterminación.....	159
5	El concepto de indeterminación.....	163
5.1	Diferentes significados del término “indeterminación”.....	163
5.2	Precedentes históricos de la noción de indeterminación.....	164
6	La relación de causalidad.....	170
7	El positivismo de Heisenberg.....	173
8	El realismo “práctico” de Heisenberg.....	179
9	Conclusión del capítulo.....	181
CAPÍTULO 3. La concepción filosófica de Einstein.....		
	Índice del capítulo.....	183
1	Introducción del capítulo.....	184
2	El progreso de la física como triunfo del credo realista.....	184
3	Giro de Einstein respecto al pensamiento de Mach.....	187
4	Actitud de Einstein ante la metafísica.....	190
5	Razón y experiencia sensorial.....	193
6	La noción de realidad física en EPR.....	196
7	Características del realismo de Einstein.....	203
8	El peculiar realismo de Einstein.....	208
9	Conclusión del capítulo.....	216

CAPÍTULO 4. La concepción filosófica de Schrödinger	219
Índice del capítulo.....	219
1 Introducción del capítulo.....	221
2 La herencia de Boltzmann y Exner.....	221
3 La creación de la mecánica de ondas.....	226
3.1 Problemas de la teoría de Bohr.....	226
3.2 El legado de Hamilton.....	228
3.3 Las ondas de de Broglie.....	229
3.4 Las ondas de Schrödinger.....	231
4 El gato de Schrödinger.....	246
5 El entrelazamiento.....	253
6 La noción de salto cuántico.....	254
7 La noción de partícula elemental.....	258
8 La influencia de Mach.....	262
9 Actitud de Schrödinger ante la metafísica.....	268
10 La concepción metafísica de Schrödinger.....	270
10.1 La justificación del monismo.....	270
10.2 Precedentes del monismo de Schrödinger.....	273
10.3 Schopenhauer y Kant.....	276
11 La imagen del mundo que ofrece la ciencia natural.....	278
11.1 El origen de la ciencia natural.....	278
11.2 El principio de inteligibilidad.....	280
11.3 El principio de objetivación.....	285
11.4 La interferencia sujeto-objeto.....	289
12 Causalidad y azar.....	290
13 El realismo de Schrödinger.....	298
14 Conclusión del capítulo.....	300
 CAPÍTULO 5. Marco social del debate sobre la causalidad	 303
Índice del capítulo.....	303
1 Introducción del capítulo.....	304
2 Individualidad, visualización y acausalidad.....	304

3	El surgimiento y la aceptación de la acausalidad.....	306
4	Las tesis de Forman.....	309
5	Conclusión del capítulo.....	314

SEGUNDA PARTE. Los experimentos de Renninger

CAPÍTULO 6. Los artículos de Renninger de 1953 y 1960.....	316
Índice del capítulo.....	316
1 Introducción del capítulo.....	318
2 La teoría de la medida.....	319
2.1 La medida en la física clásica y en la física cuántica.....	319
2.2 La teoría de la medida de von Neumann.....	320
2.3 La elaboración de London y Bauer.....	325
2.4 La propuesta de Wigner.....	327
2.5 La aportación de von Weizsäcker.....	328
2.6 El modelo de Daneri, Loinger y Prosperi.....	329
3 M.Renninger. Notas biográficas	333
4 ”Sobre la dualidad onda-partícula”, el artículo de Renninger (1953).....	334
4.1 Introducción: relación con Einstein.....	334
4.2 Objetivo del artículo.....	336
4.3 Contexto del artículo.....	339
4.4 El experimento.....	345
5 ”Medidas libres de interacción”, el artículo de Renninger (1960).....	353
5.1 Marco conceptual.....	354
5.2 El experimento.....	359
5.3 La respuesta de Heisenberg.....	362
5.4 El punto de vista de de Broglie.....	364
6 El experimento de Epstein, precedente de los experimentos de Renninger.....	370
6.1 El problema de la realidad.....	371
6.2 El experimento mental de Epstein.....	373
6.3 Relación entre el artículo de Epstein y los de Renninger.....	382

7	Posibles interpretaciones de los experimentos de Renninger.....	384
7.1	¿Cómo interpretaría Bohr los experimentos de Renninger?.....	384
7.2	¿Cómo interpretaría Einstein los experimentos de Renninger?.....	391
7.3	¿Cómo interpretaría Heisenberg los experimentos de Renninger?.....	397
7.4	¿Cómo interpretaría Schrödinger los experimentos de Renninger?.....	403
8	Desarrollos posteriores.....	406
8.1	El experimento de Elitzur y Vaidman.....	406
8.2	La versión de Penrose.....	412
8.3	Los experimentos de Herzog, Kwiat, Weinfurter y Zeilinger.....	416
9	Conclusión del capítulo.....	421
	CONCLUSIONES FINALES.....	424
	BIBLIOGRAFÍA.....	435

INTRODUCCIÓN

La forma en que la física y la filosofía contemporáneas entienden los fenómenos cuánticos proviene de la forma en que los entendieron Bohr y Heisenberg, creadores, entre otros, del núcleo esencial de la interpretación de Copenhague, la interpretación mayoritaria de la mecánica cuántica. Según ellos, para extraer información de un objeto es necesario interactuar con éste. Y, en la interacción, debido al postulado cuántico, siempre se produce un intercambio de energía, cuya magnitud es múltiplo del *quantum* de acción. Por consiguiente, el intercambio energético que se da entre el dispositivo de observación y el objeto observado, cuando interactúan, provoca en el objeto una perturbación inevitable, que origina una indeterminación en su medida. En palabras de Bohr y Heisenberg:

“El postulado cuántico implica que toda observación de los fenómenos atómicos lleva aparejada una interacción con el aparato de observación que no puede ser despreciada.”

N.Bohr¹

”La ecuación de movimiento para la función de probabilidad contiene ahora la influencia de la interacción con el aparato de medida. Esta influencia introduce un nuevo elemento de incertidumbre.”

W.Heisenberg²

Mas Renninger, físico especialista en interferencia de rayos-X, presentó, en 1953 y en 1960, unos experimentos en los que se podía extraer información de un objeto, cuántico o clásico, sin que éste fuera perturbado. Por consiguiente, dichos experimentos implicaban la necesidad de revisar la inevitabilidad de la perturbación ejercida por el dispositivo de medida sobre el objeto medido, las consecuencias que de dicha perturbación la interpretación de Copenhague extraía y, entre ellas, la justificación que ésta ofrecía de las relaciones de indeterminación de Heisenberg.

“La justificación habitual de la relación de incertidumbre como una inevitable retroacción de cada proceso de medida sobre el sistema medido se derrumba.”

M.Renninger³

1 N.Bohr. *La teoría atómica y la descripción de la naturaleza* . (p.99)

2 W.Heisenberg. *Física y filosofía*. (p.38)

3 M.Renninger. Interaction-free Measurements, traducción de “Messungen ohne Störung des Mesobjekts”, *Zeitschrift für Physik* **158** (p.417-421)(1960) . La traducción, realizada por W. De Baere, se encuentra en *History of the Development of Quantum Mechanics* en *Quantum Theory. AIP.Conference Proceedings*. Melville, New York. 2007,

En este trabajo, llamaremos IFMs, *interaction-free* measurements, medidas sin interacción, a los dos experimentos de Renninger, aunque él no los denominó con este término. De hecho, él llamó “medida negativa” al de 1960, puesto que consiste en la afirmación de una ausencia de resultados positivos. Si denominamos IFMs a sus experimentos es porque presentan las mismas características esenciales que las actuales IFMs⁴, que se iniciaron a partir de la publicación, en 1993, del experimento de Elitzur y Vaidman.

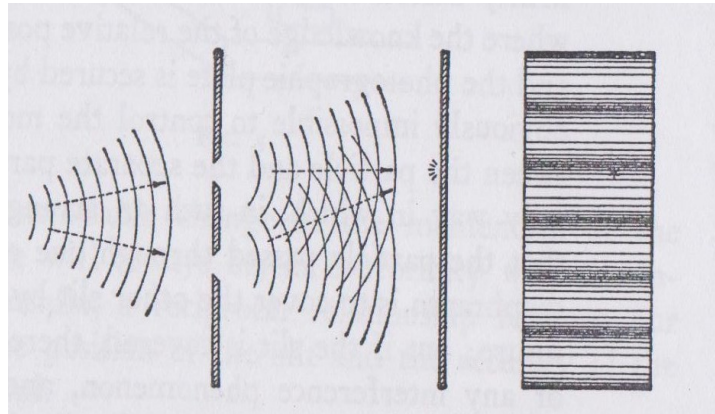
El modelo básico de las IFMs actuales se realiza en un interferómetro óptico, dispositivo que se basa en el denominado “experimento de la doble rendija”. Por esta razón, en primer lugar, vamos a ver brevemente en qué consiste dicho experimento, para después introducirnos en el funcionamiento del experimento IFM.

El experimento de la doble rendija

Este experimento muestra que si en una cámara oscura se emite un haz de luz que se dirige a un diafragma con dos rendijas y tras el diafragma hay una pantalla, entonces en dicha pantalla se observan franjas paralelas oscuras y brillantes. La justificación de la existencia de estas bandas se basa en la naturaleza ondulatoria de la luz y es la siguiente: cuando la luz pasa por las dos rendijas genera dos ondas que interfieren entre sí y en los lugares en los que éstas coinciden en fase, es decir, la cresta de una onda coincide exactamente con la cresta de la otra onda, se suma cresta con cresta y valle con valle y se produce interferencia constructiva y, en cambio, en los lugares donde se superponen las ondas de fase opuesta, de manera que la cresta de una onda se suma al valle de la otra onda, la interferencia es destructiva. Las zonas de interferencia constructiva de las ondas se corresponden con las franjas brillantes en la pantalla, mientras que las zonas de interferencia destructiva se corresponden con las franjas oscuras, tal como aparece en la figura siguiente.

vol.962 (p.9)

4 Aunque hay debate acerca de la idoneidad de llamar a este tipo de procedimientos *interaction-free*, no entraremos en este debate y aceptaremos esta denominación por ser la más ampliamente utilizada.

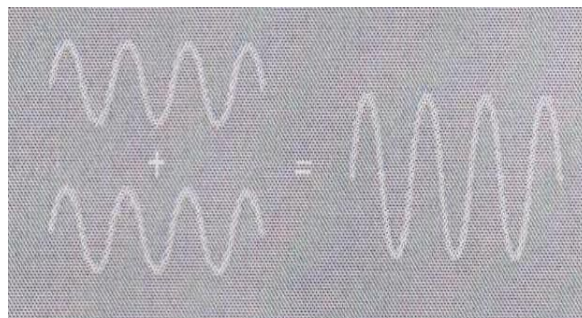


Diafragma con
dos rendijas

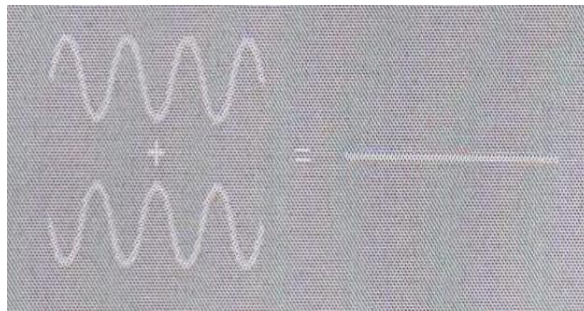
Pantalla

Franjas de
interferencia que
se observan

INTERFERENCIA CONSTRUCTIVA

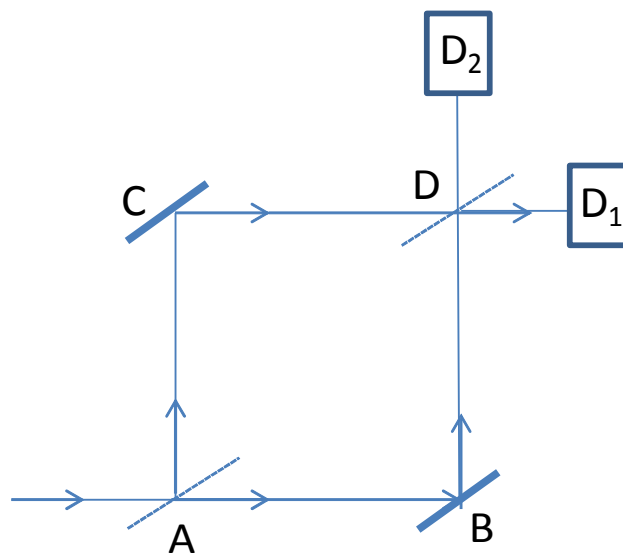


INTERFERENCIA DESTRUCTIVA



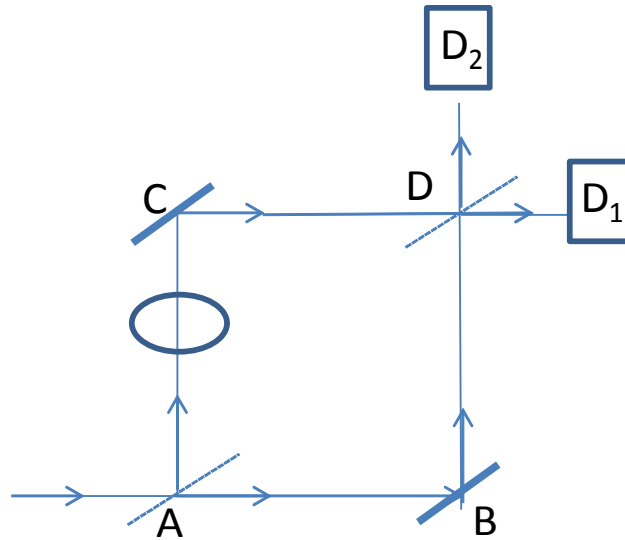
El experimento IFM

El experimento IFM muestra que es posible ver un objeto que está presente sin que la luz interactúe con él. Para dar más emoción al experimento se imaginó que dicho objeto era una bomba supersensible que explotaría si un solo fotón impactaba con su superficie. La justificación del experimento es la doble naturaleza de la luz, ondulatoria y corpuscular, y se realiza en un interferómetro Mach-Zehnder, un dispositivo como el de la figura inferior, que contiene dos espejos en los puntos C y B, dos divisores de haz situados en los puntos A y D y dos detectores, que son D_1 y D_2 . Si el camino de arriba y el de abajo del interferómetro son iguales en él se realiza el experimento de la doble rendija, correspondiendo los detectores a las franjas de interferencia, D_1 a la banda de interferencia constructiva y D_2 a la banda de interferencia destructiva.



Según la descripción ondulatoria, cuando la luz entra en el interferómetro por el extremo inferior izquierdo constituye una onda que al impactar con el divisor de haz situado en el punto A se divide en dos ondas, una que se propaga por el camino hacia arriba y otra que se propaga por el camino de abajo hacia la derecha. Así, la primera llega al espejo situado en B y se refleja y la segunda llega al espejo situado en C y también se refleja. Ambas ondas reflejadas se reúnen en D, donde interfieren, se superponen y el divisor de haz envía la luz al detector D_1 , que corresponde a la banda brillante, a la interferencia constructiva, mientras el detector D_2 permanece oscuro porque no llega luz hasta él, ya que corresponde a la banda de interferencia destructiva.

Cuando hay un objeto interpuesto en uno de los caminos del interferómetro, como se representa en la figura inferior, se necesita la descripción corpuscular de la luz para explicar los fenómenos que se observan. En esta descripción el fotón es una partícula indivisible y sólo se desplaza por uno de los dos caminos del interferómetro y la función del divisor de haz es ofrecer la probabilidad de que el fotón vaya por un camino o por otro.



Cuando entra un fotón en el interferómetro, el experimento presenta tres resultados posibles:

- i) En un 50% de los casos, ningún detector se ilumina, lo cual indica que el fotón ha sido absorbido o dispersado por el objeto y no ha llegado a los detectores finales. En el caso imaginario de que el objeto fuera una bomba, ésta hubiera explotado.
- ii) En un 25% de los casos, se ilumina el detector D_1 . Este resultado no es significativo, puesto que no indica que un objeto esté presente en un camino del interferómetro ni que no lo esté, ya que, por una parte, siempre que no hay ningún objeto interpuesto, como hemos visto, se ilumina D_1 y, por otra parte, también existe la posibilidad de que, estando el objeto en un camino, el fotón se desplace por el otro camino y éste se refleje en el divisor de haz situado en D y finalmente salga por D_1 .
- iii) En un 25% de los casos, se ilumina el detector D_2 . Este resultado es significativo, puesto que indica que hay un objeto interpuesto en uno de los caminos del interferómetro, el fotón

ha ido por el otro camino, éste se ha transmitido en el divisor de haz situado en D y finalmente ha salido por D₂. Por consiguiente, este resultado corresponde a una IFM, una medida sin interacción, ya que se “ve” el objeto sin que el fotón lo toque.

Cabe señalar que si bien en un principio, como vemos, el rendimiento de las IFM era sólo de un 25%, posteriormente se llegó cerca del 100%.

Objetivos y tesis del trabajo

La admiración que provocan los experimentos IFMs llevó a preguntarnos por qué y cómo surgieron. Así, la búsqueda del origen de las IFMs y del contexto en que éstas nacieron fue el primer objetivo de nuestra investigación. Al descubrir que aparecieron en el marco del debate filosófico sobre la interpretación de los fundamentos de la mecánica cuántica apareció un nuevo objetivo: investigar cómo afectan a dicha interpretación y muy especialmente, a la necesidad de renunciar a algunos de los principios realistas de la física clásica que defendían muchos físicos. Así, en síntesis, los objetivos de nuestra investigación han sido buscar y estudiar:

- el origen histórico de las IFM

- el marco conceptual en el que surgieron las IFM

- las implicaciones filosóficas de las primeras IFM

Y la tesis que pretendemos defender con este trabajo, en el que exponemos los resultados de nuestra investigación, es que las IFMs tienen su origen en dos experimentos de Renninger, que surgieron en el marco del debate de la primera mitad del siglo XX sobre la interpretación de la mecánica cuántica, y sus implicaciones filosóficas llevan a la pertinencia de revisar la justificación de enunciados fundamentales que Bohr y Heisenberg transmitieron a la interpretación dominante.

Las primeras IFMs

La búsqueda del origen de las IFMs nos llevó a encontrar en los trabajos que Renninger publicó en 1953⁵ y en 1960⁶, el primero de forma implícita y el segundo de forma explícita, el germen del cual surgieron los experimentos IFMs. Aunque Renninger era un físico experimental especializado en cristalografía, concretamente en la física de interferencia de rayos X⁷, se sentía también atraído por los problemas fundamentales de la mecánica cuántica y, utilizando su habilidad experimental, diseñó dos experimentos mentales que publicó como aportación al debate sobre la interpretación del formalismo de la mecánica cuántica. Así, los autores consultados⁸ que en sus artículos tratan de las raíces históricas de las IFMs sitúan el experimento de Renninger publicado en 1960 como el primer “experimento” IFM. Aunque a este experimento a menudo⁹ se lo denomina “medida de resultado negativo”, puesto que en él la no observación de un resultado implica un colapso de la función de onda, es en esencia una IFM porque en él surge la observación a partir del hecho de que no hay ningún cambio en el estado del detector. Tal como veremos, en la medida de resultado negativo de Renninger de 1960 la observación de que el fotón no incida sobre una primera pantalla –es decir, no se perciba ningún destello en ella-- indica que incidirá sobre otra segunda pantalla. Así, la función de onda del fotón, que en principio tenía dos componentes, el que representaba la posibilidad de chocar con la primera pantalla y el que representaba la posibilidad de chocar con la segunda, se reduce a un solo componente, el de chocar con la segunda.

Pero ¿cómo ha sido reconocido el experimento de 1953 en la historia reciente de las IFMs? Tan solo hemos encontrado una referencia, la que hace Vaidman en uno de sus artículos¹⁰, en el que

-
- 5 M.Renninger. Zum Wellen-Korpuskel-Dualism. *Zeitschrift für Physik* **136** (p.251-261) (1953). La traducción, On Wave-Particle Duality, realizada por W. De Baere, se encuentra en *History of the Development of Quantum Mechanics* en *Quantum Theory. AIP.Conference Proceedings*. Melville, New York. 2007, vol.962 (p.3)
- 6 M.Renninger. Interaction-free Measurements, traducción de “Messungen ohne Störung des Mesobjekts”, *Zeitschrift für Physik* **158** (p.417-421)(1960) . La traducción, realizada por W. De Baere, se encuentra en *History of the Development of Quantum Mechanics* en *Quantum Theory. AIP.Conference Proceedings*. Melville, New York. 2007, vol.962 (p.9)
- 7 Como él mismo manifestaba en una carta dirigida a Einstein el 30 de mayo de 1953
- 8 Ver, por ejemplo, los siguientes artículos:
P.Kwiat, H.Weinfurter, T.Herzog, A.Zeilinger. Interaction-Free Measurement, *Physical Review*, **74** (1995)
A.G.White, J.R.Mitchell, O.Nairz, P.Kwiat, 'Interaction-Free' Imaging, arXiv:quant-ph/9803060v2 26 Apr 1998
S.Pötting, E.S.Lee, W.Schmitt, I.Rumyantsev, B.Mohring, P.Meystre, Quantum coherence and interaction-free measurements, *Physical Review A*, Vol. 62 (2000)
- 9 Como, por ejemplo, P.G.Kwiat, A.G.White, O.Nairz, G.Weih, H.Weinfurter y A.Zeilinger, High-efficiency quantum interrogation measurements via the quantum Zeno effect,(1999), arXiv:quant-ph/9909083v1 27 Sep 1999.
Renninger denomina “ medida 'negativa'” a su experimento de 1960, pero De Baere traduce el título original, “*Messungen ohne Störung des Messobjekts*” , literalmente “Medidas sin perturbar los objetos medidos”, como “Interaction-free Measurements”
- 10 L.Vaidman, The Meaning of the Interaction-Free Measurement, *Foundations of Physics*, Vol.33. No.3 (March 2003)

manifiesta que Renninger había publicado en 1953 un trabajo donde presentaba un dispositivo casi idéntico al que Elitzur y Vaidman¹¹ habían presentado en 1993, pero con un objetivo diferente al de éstos, que pretendían obtener información de un objeto —que podía ser una bomba— de forma que no hubiera ninguna interacción con él. El experimento de Elitzur y Vaidman tuvo gran repercusión y fue tomado como base para posteriores desarrollos que veremos al final de nuestro trabajo. Fue expuesto por sus autores con gran claridad y, por esta razón, ha sido utilizado para ofrecer el modelo básico de IFM al principio de esta introducción. Efectivamente, como veremos, el objetivo de Renninger no es el de Elitzur y Vaidman, pero el montaje, el procedimiento y el cálculo de probabilidades de los posibles resultados finales del experimento son los mismos. Por esta razón, mantenemos que el experimento mental que Renninger presentó en 1953 puede considerarse como un primer embrión de las IFMs diseñadas posteriormente.

El objetivo principal que Renninger declaraba en su artículo de 1953 era teórico y estaba referido a los fundamentos de la mecánica cuántica, puesto que con el experimento que había diseñado se proponía defender la tesis de de Broglie, es decir, pretendía mostrar empíricamente la existencia real de la onda guía, de la onda que acompaña la partícula cuántica. En el experimento de Renninger esta partícula cuántica era el fotón que se desplazaba por los brazos de un interferómetro y podía incidir o no sobre un objeto absorbente —que corresponde a la bomba interpuesta en el dispositivo de Elitzur y Vaidman—. Renninger, como veremos, al igual que Elitzur y Vaidman, observó que había la posibilidad de que el detector final indicara que existía un objeto interpuesto sin que el fotón hubiera chocado con él; pero supeditó la observación de este fenómeno a su objetivo principal, la demostración de la existencia de la onda que transporta el fotón.

Como mantiene W. De Baere¹², el objetivo con el que Renninger diseñó su experimento de 1953 se situaba en el marco conceptual de la interpretación del significado que se había de atribuir al formalismo de la mecánica cuántica, tema que se debatía en la época, y la aportación de Renninger continúa siendo válida medio siglo después, cuando sigue sin haber acuerdo sobre los principios epistemológicos de la mecánica cuántica. De Baere lamenta que no se haya tenido en cuenta el trabajo que Renninger publicó en 1953. Y cita, como excepción, a Jammer, quien en su monumental

(p.501)

11 A. Elitzur y L. Vaidman. Is it possible to know about something without ever interacting with it? *Vistas in Astronomy*, vol. 37 (p.253-256) 1993

12 W.De Baere, Renninger's Thought Experiment: Implications for Quantum Ontology and for Quantum Mechanics. Interpretation, arXiv:quant-ph/0504031v1 5 Apr 2005.

W.De Baere, Reality and Locality in Quantum Mechanics, AIP Conference Proceedings, Melville, New York. Vol. 962 (2007)

obra *The Philosophy of Quantum Mechanics*¹³, hace una digresión en su exposición del desarrollo de la teoría de la medida para explicar el contenido de los dos artículos de Renninger que, según Jammer, trataban profundos problemas de la mecánica cuántica y provocaron gran discusión cuando aparecieron. Jammer en su digresión también comenta las reacciones de algunos físicos como Einstein y Heisenberg a los trabajos de Renninger (asunto que posteriormente trataremos), pero según De Baere en la comunidad de físicos de habla inglesa y francesa el artículo de Renninger de 1953 no fue percibido en absoluto. No obstante, hemos encontrado una excepción. De Broglie¹⁴ lo calificó de “*très remarquable*”, aunque, para él, como veremos, el trabajo significativo de Renninger era el de 1960, puesto que mostraba una de las dificultades que la interpretación dominante de la mecánica cuántica había de resolver.

Así pues, los dos experimentos de Renninger, tanto el de 1953 como el de 1960, muestran unos fenómenos empíricos que, según su autor, la interpretación dominante, la de Copenhague, había de tener en cuenta y explicar. Pero ¿qué se entiende por la “interpretación de Copenhague”? ¿Cuáles son sus tesis? A menudo hemos visto en la literatura estudiada que en lugar de esta expresión aparecen otras expresiones como “interpretación usual”, “interpretación mayoritaria”, “interpretación estándar” o “interpretación ortodoxa”. Y nunca son expresiones que se refieran a una concepción unitaria, a un sistema de enunciados¹⁵ determinado rigurosamente con precisión¹⁶. Más bien, constituyen generalmente expresiones que utilizaban quienes se oponían a un conjunto de tesis defendidas por una mayoría de físicos —en los artículos de Renninger, como vamos a ver, éstos son representados por Bohr, Heisenberg, Born y Jordan—. Esta concepción surgió en el espíritu del ambiente del Instituto Bohr de Copenhague, es decir, alrededor de su fundador, en torno a sus enseñanzas y debates, y fueron aprobadas por el mismo Bohr, que representa la figura paternal de la mecánica cuántica. Cuatro de las tesis fundamentales de la interpretación de Copenhague son:

13 M.Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, John Wiley & Sons, New York (1974), (p.493-496)

14 L.de Broglie, *Étude critique des bases de l'interprétation actuelle de la Mécanique Ondulatoire*, Gauthier-Villars & C^{ie} Editeur, París (1963)

15 Stapp, en su artículo *The Copenhagen interpretation*, describe la esencia de este sistema conceptual que según él está constituido por tesis que compartían Bohr y Heisenberg y para ello se basa en el capítulo “La interpretación de Copenhague de la teoría cuántica” de *Física y filosofía* de Heisenberg. Según Stapp, la filosofía general de la interpretación de Copenhague era fundamentalmente pragmatista, cercana a la de James.

H.P.Stapp, *The Copenhagen Interpretation*, *American Journal of Physics*, **40**, 1098 (1972); <http://dx.doi.org/10.1119/1.1986768>

W.Heisenberg, *Física y filosofía*, Ediciones La Isla, Buenos Aires (1959)

16 El mismo Heisenberg, creador del término “interpretación de Copenhague” y autor de algunas de sus exposiciones fundamentales, manifestaba a su discípulo Stapp: “hay que destacar en la interpretación de Copenhague que su lenguaje tiene un cierto grado de vaguedad y dudo de si puede ser más claro intentando evitar esta vaguedad”. *Ibid.*

-El postulado cuántico, según el cual la interacción entre el dispositivo de medida y el objeto medido nunca es despreciable y, por consiguiente, no se puede conocer el estado del objeto independientemente de la observación a que es sometido.

-El dualismo de descripciones complementarias, que se excluyen mutuamente, como la imagen de onda y la imagen de partícula y la descripción espacio-temporal y la descripción causal de un proceso.

-Las relaciones de indeterminación de Heisenberg, que impiden la medida exacta y simultánea de dos magnitudes conjugadas, como la posición y el momento¹⁷ de una partícula.

-La interpretación probabilística de Born, según la cual la función de onda es un recurso simbólico que describe la probabilidad de realizar determinadas observaciones bajo determinadas condiciones.

La exposición de estas tesis era a menudo acompañada de actitudes antirealistas, por las cuales se dudaba de principios fundamentales de la física clásica, como la siguiente manifestación de Heisenberg:

todos los adversarios de la interpretación de Copenhague están de acuerdo en un punto [...] Volver al concepto de realidad de la física clásica [...] Preferirían regresar a la idea de un mundo real objetivo, cuyas partes más pequeñas existen objetivamente del mismo modo que existen las piedras o los árboles, independientemente de si las observamos o no [...]

Esto, sin embargo, es imposible, o por lo menos no es completamente posible por la naturaleza de los fenómenos atómicos¹⁸

Entre los adversarios a los que se refería Heisenberg se encontraban Einstein, de Broglie y Schrödinger. Renninger compartía tesis con estos tres últimos, aunque en sus escritos sólo lo

¹⁷ Utilizamos este término con el significado de la magnitud vectorial que resulta de multiplicar la masa de un móvil por su velocidad

¹⁸ W.Heisenberg, *Física y filosofía*, *Ibid.* (p.106)

manifiesta respecto a los dos primeros, y, en cambio, mostraba su disconformidad con determinadas tesis de Bohr, de Heisenberg y de Jordan, a los que cita crítica y reiteradamente en sus trabajos.

Pero detengámonos ahora en las cuatro tesis, previamente citadas, propias de la interpretación de Copenhague. La primera, el postulado cuántico, es, según Bohr, la esencia de la teoría cuántica. Por este postulado, todos los intercambios de energía se realizan a través de transferencias discretas de energía de una magnitud que es múltiplo de h , el denominado “*quantum* de acción” o “constante de Planck”. Así pues, cuando se observa un objeto atómico con un instrumento, hay un intercambio de energía entre el objeto y el instrumento y este intercambio nunca puede ser nulo; además, en física atómica nunca puede despreciarse, debido a las dimensiones del mundo atómico; en cambio, en física clásica sí puede obviarse, puesto que el valor de h es extremadamente pequeño¹⁹ comparado con las acciones²⁰ implicadas en los fenómenos que observamos en el mundo macroscópico.

El postulado cuántico, según Bohr, tuvo consecuencias trascendentales que llevaron a revisar los fundamentos de la física clásica. Como la revolución copernicana, que apartó al hombre del centro del universo, el postulado cuántico ofreció a Bohr una lección epistemológica que le mostró que la actitud del hombre ante la naturaleza había cambiado. La razón es que dicho postulado eliminó la posibilidad de realizar una observación pura, sin perturbar de manera significativa el objeto observado. Por consiguiente, según Bohr, no se podía definir el estado del objeto, puesto que, tal como se entendía la noción de estado del objeto, exigía la eliminación de toda perturbación externa. Y tampoco se podían hacer predicciones sobre la futura evolución del sistema, es decir, sobre su comportamiento causal, entendiéndose por descripción causal la descripción determinista propia de la mecánica newtoniana, la que, partiendo del estado de un sistema físico definido en un instante dado, permite predecir su estado en cualquier instante posterior. Así, el postulado cuántico no sólo lleva a Bohr a abandonar la causalidad sino también a renunciar a la posibilidad de un conocimiento objetivo de los fenómenos atómicos, puesto que es imposible conocer el objeto tal como es, independientemente del sujeto observador. Además, el postulado cuántico lleva también a Bohr a renunciar a la posibilidad de visualizar los procesos atómicos, porque la interacción, según Bohr, impide crear imágenes intuitivas válidas del objeto. Finalmente, el postulado cuántico también lleva a Bohr a ver una unidad indisoluble entre sujeto y objeto, puesto que el dispositivo que perturba el objeto es dirigido, manejado y observado siempre por un sujeto. En cambio, los experimentos de

¹⁹ En el sistema internacional h es $6.63 \cdot 10^{-34}$ J.s

²⁰ En física se define la acción como la magnitud que expresa el producto de la energía implicada en un proceso por el tiempo que dura dicho proceso.

Renninger muestran que es posible realizar medidas sin perturbar el objeto observado y, además, como veremos, es también posible visualizar los procesos cuánticos.

Respecto a la segunda tesis de la interpretación de Copenhague, la complementariedad, encontramos que, en la obra de Bohr, es una noción omnipresente y fundamental, que también deriva del postulado cuántico, puesto que al observar un objeto se produce un intercambio de energía entre el objeto y el instrumento y dicho intercambio provoca una perturbación tan significativa en el objeto que puede generar descripciones tan diferentes que se excluyan mutuamente; pero aunque dichas descripciones sean excluyentes son necesarias para describir de forma completa el objeto y, por esta razón, Bohr las considera complementarias.

Bohr aplicó reiteradamente la noción de complementariedad a la luz, puesto que para comprenderla se necesita la descripción ondulatoria, que explica fenómenos como la interferencia y la difracción de las ondas luminosas, y la descripción corpuscular, que explica fenómenos como el efecto fotoeléctrico y el efecto Compton. Dependiendo de cómo se observe la luz, se ve un aspecto u otro. Pero ambas descripciones, que utilizan nociones diferentes, son excluyentes y necesitan experimentos diferentes. Así, según Bohr, se necesita un dispositivo para mostrar la naturaleza ondulatoria de la luz y otro distinto para mostrar su naturaleza corpuscular. Dependiendo del dispositivo que se utilice para observar la luz, se ve un aspecto u otro. En cambio, como veremos, Renninger diseñó un dispositivo en el que se percibían los dos aspectos.

Respecto a la tercera tesis de la interpretación de Copenhague, las relaciones de indeterminación de Heisenberg, cabe señalar que la justificación que se les daba era la interacción entre el instrumento de medida y el objeto que se pretendía medir. Dicha interacción se mostraba en el experimento mental del microscopio de alta resolución, que funciona con rayos γ ²¹, con el que Heisenberg pretendía medir la posición y el momento de un electrón. Cuando los rayos incidirían sobre el electrón para determinar la posición de éste, le provocarían una alteración en su momento y dicha perturbación imposibilitaría el conocimiento exacto de la posición y el momento del electrón. En cambio, como veremos, Renninger presentaba sus medidas sin interacción como objeción a la justificación que los seguidores de la interpretación mayoritaria ofrecían de la indeterminación del objeto medido, que era debida a la inevitable interacción producida por el proceso de medida.

21 Ya que cuanto menor es la longitud de onda de la radiación que se utiliza mayor es la precisión del microscopio

Así, hemos visto que Heisenberg derivaba las relaciones de indeterminación del postulado cuántico, la esencia de la teoría cuántica, según Bohr. Y estas relaciones le llevaban a renunciar a la causalidad, como Bohr. El argumento que presentaba Heisenberg era que la causalidad no se puede aplicar a los fenómenos cuánticos porque en el enunciado condicional que constituye la formulación de la ley de la causalidad, “Si conocemos con precisión el presente, entonces somos capaces de predecir el futuro”²² el antecedente no puede ser verdadero, porque, debido a las relaciones de indeterminación, el presente nunca se podrá conocer con precisión.

Por su parte, Bohr, a partir de las relaciones de indeterminación de Heisenberg, derivaba la complementariedad anteriormente citada entre descripción espacio-temporal y descripción causal. El argumento que Bohr presentaba era que si se determinaba con precisión la situación en el espacio y el tiempo de un objeto no se podía medir con precisión su momento, es decir, su energía, que él asociaba con su descripción causal. En cambio, veremos que Renninger, aunque acepta y utiliza las relaciones de indeterminación, no considera que haya ninguna incompatibilidad entre la descripción espacio-temporal y la descripción causal, puesto que en uno de sus experimentos estudia la onda que se propaga en el espacio y el tiempo como una realidad física sobre la cual se puede causalmente influir. Y Renninger no asocia la energía a la descripción causal, como hace Bohr.

Respecto a la cuarta tesis de la interpretación de Copenhague, cabe señalar que hemos encontrado que la noción de función de onda, desde su aparición, creó muchos problemas de interpretación, puesto que funcionaba muy bien pero no se sabía exactamente qué significado otorgarle, no se sabía si dotarla de un significado físico o tan solo simbólico e instrumental. Finalmente, se adoptó la interpretación estadística de Born, según la cual la función de onda es un recurso matemático para calcular la probabilidad de obtener un determinado resultado en una medida. Como veremos, Renninger acepta la interpretación estadística de la interpretación de Copenhague, pero no se conforma con ella y pretende mostrar, a través de su experimento, que la onda es también una realidad física.

La oposición a la interpretación de Copenhague

²² W.Heisenberg. Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik, *Zeitschrift für Physik*, **43**, 172-98 (1927), traducido como The physical content of Quantum Kinematics and Mechanics por J.A.Wheeler y W.H.Zurek

Hemos visto que Renninger presenta los fenómenos que ha descubierto para que sean comprendidos e integrados en la interpretación de la mecánica cuántica. Sus experimentos están en la línea de la oposición a la interpretación de Copenhague en diversos puntos. En primer lugar, con dichos experimentos, su autor rechaza la justificación de las relaciones de indeterminación, que se basa en la perturbación producida en el objeto por el instrumento, perturbación que, por el postulado cuántico, nunca es despreciable en el dominio atómico. En segundo lugar, rechaza la complementariedad de la descripción ondulatoria y corpuscular de la luz, es decir, la concepción según la cual el modelo ondulatorio y el corpuscular se excluyen entre sí y se necesitan experimentos diferentes para mostrar las dos naturalezas de la luz. En tercer lugar, Renninger no está satisfecho con la interpretación estadística de la onda y pretende probar que la onda, además de ser un recurso formal para calcular probabilidades, es también una realidad física; concretamente, pretende probar empíricamente el modelo de onda guía de de Broglie. Y finalmente, en cuarto lugar, vemos que, para probar que la onda constituye una realidad física, utiliza la noción de causa de manera significativa.

Renninger muestra su cercanía intelectual a Einstein, el más destacado adversario de la interpretación de Copenhague, por diversas razones. Una razón es la insatisfacción con la interpretación estadística de la onda. Otra razón, que enlaza con la anterior, es la sospecha de incompletud de la teoría cuántica, por no explicar todos los hechos cuánticos experimentales. Otra razón es la voluntad de mantener la descripción causal y la descripción espacio-temporal para la comprensión de los fenómenos cuánticos. Y la razón fundamental es que Renninger manifiesta que su noción de “realidad física” está inspirada en la noción de “elemento de la realidad física” de EPR. Así, Renninger, para probar que con la partícula está asociada una onda que se propaga en el espacio y el tiempo como una realidad física, define la realidad física como la entidad en la cual “es posible influir experimentalmente de modo que los futuros resultados de los experimentos muestren de manera inambigua que esta realidad ha sido causalmente²³ influida por la actuación experimental”²⁴.

En esta concepción de realidad física de Renninger encontramos también la esencia de la respuesta que Schrödinger ofrecía ante una pregunta que planteaba la teoría atómica: ¿en qué podemos basar la existencia de objetos alejados de la percepción directa, como el electrón? La propuesta de Schrödinger era que podemos aceptar la existencia real de una entidad si observamos el efecto a

23 El subrayado es nuestro

24 M.Renninger, (1953) (p.1)

través del cual ésta se manifiesta, puesto que algo que influye sobre el comportamiento físico de otra cosa no puede llamarse menos real que ese algo sobre el que influye.

Además, como Renninger, también Schrödinger otorgaba una realidad física a la onda y tampoco se conformaba con la interpretación estadística. Schrödinger no pensaba que los descubrimientos del dominio cuántico implicaran la renuncia al ideal de la objetividad y al recurso de la visualización, los cuales contribuían a que la ciencia ofreciera una imagen inteligible del mundo. Muchos de los trabajos de Schrödinger que hemos encontrado están dirigidos a los seguidores de la interpretación de Copenhague, como los artículos de Renninger, para que tengan en cuenta su aportación. Schrödinger pensaba que la teoría cuántica tenía muchos huecos que había que llenar. Entre ellos, según Renninger, estaba la explicación de las IFMs. Por todo ello, pensamos que Renninger se encuentra también en la línea intelectual de Schrödinger, frente a la interpretación de Copenhague.

Estructura del trabajo

El trabajo que presentamos está estructurado en dos partes, de manera que en la primera se exponen los resultados de nuestra exploración del contexto conceptual en el que surgieron los experimentos IFM de Renninger y en la segunda se exponen los resultados de nuestra investigación sobre los dos artículos en los que publicó dichos experimentos.

A su vez, la primera parte está dividida en cinco capítulos. Los cuatro primeros están dedicados a la concepción filosófica de cuatro autores, dos de ellos creadores de la interpretación de Copenhague, Bohr y Heisenberg, y dos representantes de la oposición a dicha interpretación, Einstein y Schrödinger; todos ellos contribuyeron a crear las coordenadas conceptuales en las que Renninger situó sus trabajos, ya que el análisis de nociones propias de dichos autores, como la interacción, la complementariedad y la realidad física de la onda le estimularon a diseñar sus experimentos. A través de estos cuatro capítulos estudiamos el pensamiento de los cuatro fundadores de la mecánica cuántica desde “dentro” de ella, a través de las fuentes, tal como estos autores explican su aportación al desarrollo inicial de esta teoría. En cambio, el quinto capítulo ofrece una perspectiva desde “fuera” del desarrollo interno conceptual de la teoría, a través de la influencia del ambiente intelectual de la sociedad de la época en la que se forjó la interpretación de la mecánica cuántica. Finalmente, la segunda parte del trabajo muestra los resultados del análisis que hemos realizado de

los dos artículos de Renninger, así como de otros trabajos previos que ayudan a entenderlos, de las repercusiones que tuvieron y de su continuación en desarrollos posteriores de IFMs relativamente recientes.

La primera parte del trabajo: el contexto conceptual

La exposición de nuestro trabajo comienza adentrándonos en el pensamiento filosófico de Bohr y Heisenberg, creadores de la interpretación de Copenhague. Por esta razón, los resultados más significativos de nuestra búsqueda han sido ya sintetizados en el anterior apartado dedicado a la interpretación de Copenhague de esta introducción. Nos limitaremos ahora a completarlos.

Así, el primer capítulo está dedicado al pensamiento de Bohr, fuente de inspiración de los seguidores de la interpretación dominante, a los cuales se dirige Renninger para que tengan en cuenta los resultados de sus dos experimentos. La concepción filosófica de Bohr surgió de la lección epistemológica que le ofrecían los descubrimientos²⁵ de la física cuántica, algunos de los cuales fueron protagonizados por el propio Bohr. Por esta razón hemos explorado sus logros científicos en cuanto están relacionados con su pensamiento filosófico. Su mayor logro fue su modelo de la estructura interna del átomo, que justificaba el hecho de que los átomos sean estables. Según su teoría, el electrón no llegaba a caer sobre el núcleo porque no podía descender a un estado más bajo que el estado fundamental.

Un grave problema significó para Bohr la interpretación de la dualidad onda-partícula, problema que hemos encontrado continuamente presente en la obra de los cuatro autores que hemos estudiado, pero especialmente en la de Bohr, y problema que también se encuentra en la base del artículo de Renninger de 1953. Bohr durante mucho tiempo no aceptó la hipótesis de los *quanta* de luz de Einstein, que explicaba la interacción discontinua entre materia y radiación, y por esta razón construyó, junto a Kramers y Slater, una teoría según la cual la energía y el momento intercambiados entre átomos y radiación no se conservaban en las interacciones individuales sino sólo en el valor medio de un conjunto de numerosas transiciones. El mecanismo que Bohr, Kramers y Slater postulaban se basaba en la noción de un campo de radiación virtual provocado por un átomo. Así, consideraban que cada átomo estaba constituido por un conjunto de osciladores

²⁵ Por ello podemos especular que si hubiera conocido los descubrimientos de Renninger también hubiera extraído una lección epistemológica que le hubiera llevado a revisar su interpretación de los fenómenos cuánticos.

armónicos virtuales y los átomos se comunicaban entre sí por los campos virtuales —que no transportaban energía ni momento— producidos por dichos osciladores. De manera análoga, veremos también que Renninger, en su trabajo de 1953, para explicar los fenómenos de interacción entre la radiación y la materia que observa en su dispositivo, postula una onda “vacía” que rememora el campo virtual de Bohr, Kramers y Slater. Sin embargo, según la hipótesis de BKS, las transiciones, que hemos visto que no conservaban la energía ni el momento, sólo seguían relaciones estadísticas y no aceptaban la relación de causalidad. En cambio, Renninger en dicho trabajo no se conforma con las relaciones estadísticas, porque considera que no explican suficientemente la realidad, y aplica la relación de causalidad para mostrar la realidad de la onda.

La evidencia empírica refutó la hipótesis BKS, pero tampoco entonces Bohr aceptó la hipótesis de los *quanta* de luz de Einstein. Bohr mantenía que no era posible ofrecer un modelo clásico de descripción espacio-temporal de la interacción entre la radiación y la materia y los *quanta* constituían tan sólo una noción simbólica para “salvar” los fenómenos, como también era sólo un recurso formal para justificarlos la noción de “onda guía” de de Broglie, con la cual éste ampliaba la dualidad onda-partícula a toda la materia. En cambio, Renninger en su trabajo de 1953 pretende mostrar que realmente cada *quantum* consiste en una partícula acompañada por una onda que la guía y manifiesta que las proposiciones que prueba para la luz en el rango visible son también válidas, en una forma apropiadamente modificada, para la radiación de la materia.

Posteriormente Bohr admitió que si una de las nociones, la de onda o la de partícula, no funcionaba entonces se había de utilizar la otra. Y de esta forma llegó a una de las condiciones de su famosa relación de complementariedad, la de que las dos nociones son necesarios. Las relaciones de indeterminación de Heisenberg le permitieron a Bohr ver que es posible que no haya contradicción entre los dos modelos, puesto que no se han de aplicar al mismo objeto en el mismo experimento, es decir, le inspiraron la segunda condición de la complementariedad, la de que los dos modelos sólo son aplicables a través de dispositivos experimentales que se excluyen mutuamente. En cambio, Renninger en su experimento de 1953 pretende mostrar que en un solo dispositivo experimental se manifiestan las dos naturalezas de la luz y sugiere que también las dos naturalezas de la materia, según el modelo de de Broglie.

El postulado cuántico constituye, según Bohr, como hemos visto, la esencia de la mecánica cuántica, puesto que, como hemos visto, tiene consecuencias trascendentales para sus principios

fundamentales, ya que la interacción con el instrumento de observación hace imposible definir, de manera inequívoca, el estado del objeto, que exigiría la eliminación de toda perturbación externa. Así, el estado de un sistema, es decir, el conjunto de todas las coordenadas de posición y los momentos de las partes del sistema, en un determinado instante es la información que se utiliza para predecir la evolución futura del sistema, la cual, según Bohr, constituye su comportamiento causal. En cambio, Renninger, en su artículo de 1953, describe causalmente los fenómenos que se perciben en su experimento y la descripción causal que realiza cumple una función esencial en su trabajo, porque le permite conseguir su objetivo, que es demostrar la realidad de la onda. Así, cuando cambia la actuación del experimentador en el dispositivo cambia el fenómeno observado y este cambio ocurre siempre de forma regular, según una relación de causa-efecto. Aunque la onda no sea directamente observable, se pueden observar sus efectos en el dispositivo y estos efectos pueden ser alterados por el investigador según una regla fija, es decir, según una relación de causalidad.

En la obra de Bohr encontramos reiteradamente su noción de complementariedad. En un principio, como hemos visto, la aplicó a la dualidad onda-partícula y posteriormente a la descripción espacio-temporal y causal. Justificaba la incompatibilidad entre las dos últimas descripciones basándose en las relaciones de indeterminación de Heisenberg: la descripción causal implica el conocimiento de la energía o el momento del objeto, pero conocer con exactitud la situación impide conocer el momento y conocer con exactitud el tiempo impide conocer la energía. De nuevo, en cambio, encontramos que Renninger en su experimento de 1953 realiza una descripción causal y una descripción espacio-temporal de los fenómenos que observa.

Mas Bohr también aplicó su noción de complementariedad a otros dominios alejados de la física atómica, como la psicología, puesto que la lección epistemológica que Bohr extraía del estudio de los procesos cuánticos podía extenderse a otros campos del conocimiento humano, puesto que éste, en el fondo, según Bohr, es esencialmente unitario. Así, todas las ciencias se refieren a la descripción de los fenómenos observados; por consiguiente, todas comparten el problema de la observación y pueden beneficiarse de la aplicación de las nociones creadas para entender la observación en teoría cuántica, en la cual se ha superado, según Bohr, el supuesto clásico de que la descripción de un objeto permite presentar propiedades poseídas por el objeto independientemente de su interacción con el instrumento de observación.

La noción de complementariedad, que integra aspectos aparentemente contrarios, forma parte de

una concepción general dialéctica que se encuentra en el pensamiento oriental y occidental. Así, por ejemplo, entre los presocráticos la hallamos en los aforismos de Heráclito de Éfeso, entre los que destaca el siguiente: “lo mismo es vida y muerte, velar y dormir, juventud y vejez; aquellas cosas se cambian en éstas y éstas en aquéllas”²⁶, y en la aporía de Zenón de Elea, quien al contemplar una flecha que se movía en el aire veía dos aspectos contradictorios²⁷: el estado de movimiento que aparece ante nuestros sentidos y el estado de reposo en el que podemos pensar que se encuentra la flecha en cada instante.

Pero la noción de complementariedad veremos que ha recibido diversas críticas, puesto que es una noción intuitiva, que no es propia del pensamiento científico analítico y no lleva a descubrir leyes teóricas que permitan realizar predicciones precisas y contrastables. Sin embargo, en su momento significó un recurso útil para mantener, sin interpretación realista, unos modelos de visualización clásicos. En cambio, Renninger, que mantenía una interpretación realista, aceptaba que la onda y el *quantum* eran realidades no excluyentes y, por consiguiente, no necesitaba la noción de complementariedad. En la actualidad pensamos que esta última noción conserva la función de constituir un marco conceptual general con el que entender el mundo y el ser humano bajo sus múltiples y diferentes —incluso opuestas— facetas.

En la obra de Bohr encontramos la influencia de la epistemología de Høffding, su mentor, quien mantenía que la continuidad era esencial para nuestra comprensión de la experiencia. Por esta razón, la dualidad entre continuidad —propia del mundo macroscópico— y discontinuidad —propia del mundo atómico— constituía para Høffding un grave problema filosófico. Y encontramos en Bohr que uno de los argumentos por los cuales falla la relación de causalidad en el mundo atómico es porque en éste falla la continuidad.

Por otra parte, Bohr, aunque estaba convencido de la realidad de los átomos, mantenía que no se pueden construir modelos completos y realistas del átomo y en el dominio atómico sólo es posible trabajar con analogías. Por esta razón, podemos decir que los rasgos de realismo de Bohr corresponden a un realismo de entidad, pero no de teoría. El realismo de teoría que mantenía Einstein le enfrentaba a Bohr. Según Einstein, construimos teorías científicas para representar la realidad tal como es, independientemente de si es observada o no. Así, en el famoso debate entre

26 G.S.Kirk y J.E. Raven, *Los filósofos presocráticos*. Madrid: Editorial Gredos, 1983

27 G.S. Kirk y J.E. Raven, *Los filósofos presocráticos*. *Ibid.*

Einstein y Bohr se muestra que aquél nunca aceptó las conclusiones a las que los descubrimientos de la mecánica cuántica llevaron a Bohr respecto a los fundamentos de esta teoría .

Einstein no aceptó que las relaciones de indeterminación constituyeran un principio de indeterminación, último y definitivo. Por esta razón, se esforzó en diseñar experimentos mentales que le permitieran medir con precisión las propiedades de los objetos. Einstein pretendía eludir las relaciones de indeterminación, que son esenciales en la fundamentación de la mecánica cuántica según la interpretación de Copenhague, porque de ellas Bohr y Heisenberg derivaban la acausalidad y la imposibilidad de la descripción espacio-temporal.

Así, Einstein representaba el modelo de teoría realista propio de la física clásica, puesto que conservaba la relación de causalidad y la distinción entre sujeto y objeto, negaba el probabilismo y no aceptaba la contradicción. En cambio, Bohr representaba un paradigma completamente diferente, puesto que subsumía la causalidad en la complementariedad, veía el sujeto y el objeto como una unidad indisoluble y aceptaba el azar.

El segundo capítulo de este trabajo está dedicado al pensamiento de Heisenberg, creador²⁸ de una parte considerable del núcleo esencial de la interpretación de Copenhague y a cuyas tesis a menudo se refiere Renninger en sus artículos. Dos fueron sus grandes aportaciones a la mecánica cuántica: la creación de la mecánica de matrices y la derivación de las relaciones de indeterminación.

La creación de la mecánica de ondas fue motivada básicamente por la insatisfacción que Heisenberg sentía ante la situación de la teoría cuántica, puesto que se encontró con una teoría que consistía²⁹ en un conjunto no sistematizado de hipótesis, principios, analogías, reglas y argumentos *ad hoc* y pretendió crear una teoría lógicamente consistente. Heisenberg consideraba que las reglas que se usaban en teoría cuántica para calcular magnitudes observables, como la energía del átomo de hidrógeno, contenían relaciones entre cantidades que no eran observables, como la posición del electrón; en realidad, sólo se podía observar la condensación de pequeñas gotas que formaban líneas irregularmente curvas en la cámara de niebla. Por esta razón, Heisenberg se propuso crear una teoría en la que únicamente hubiera relaciones entre cantidades observables e impuso como postulado

28 H.P.Stapp, The Copenhagen Interpretation, *American Journal of Physics*, **40**, 1098 (1972), disponible en <http://dx.doi.org/10.1119/1.1986768>

29 M.Jammer, *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, New York: American Institute of Physics (1989) (p.208)

básico de dicha teoría el criterio positivista de la observabilidad de todas las cantidades. Al problema de los observables se enfrentó también Renninger, quien se planteó la cuestión de si es real la onda, que no puede ser directamente observada. La respuesta que ofreció fue que, aunque ésta no sea observable, sí son observables sus efectos en el interferómetro, efectos que pueden ser alterados por el investigador según relaciones fijas, que Renninger considera relaciones causales.

Por otra parte, la derivación de las relaciones de indeterminación llevó a Heisenberg a pensar que, aunque nociones propias de la física clásica, como la posición, el momento, la energía y el tiempo, podían utilizarse para describir procesos atómicos, los experimentos que ofrecían tales descripciones siempre sufrían una indeterminación inevitable que, según Heisenberg, era debida al proceso de medida. En cambio, según Renninger, no es la acción del proceso de medida sobre el objeto lo que justifica la indeterminación, puesto que en su experimento IFM publicado en 1960 se observa una medida sin interacción. Entonces Renninger propone sustituir la que denomina *übliche*, usual, justificación de las relaciones de indeterminación, basada en la inevitable acción de cualquier proceso de medida sobre el objeto por otra justificación que Renninger califica de *wirklich tragende*, realmente fundamental, que consiste en la permanente influencia sobre el objeto de toda la materia del alrededor, de la materia que se encuentra “en su vecindad inmediata o más distante, independientemente de si esta materia forma parte de un aparato de medida o no”³⁰.

Heisenberg consideraba que las relaciones de indeterminación constituían la base de la interpretación de la mecánica cuántica y, en cambio, Bohr consideraba que lo era la relación de complementariedad y las relaciones de indeterminación constituían sólo un caso especial del principio general de la complementariedad, porque en cada una de ellas se combina un símbolo referido a la imagen ondulatoria y un símbolo referido a la imagen corpuscular. Finalmente, Heisenberg admitió que la indeterminación estaba “relacionada directamente con la necesidad de atribuir igual validez a experimentos completamente diferentes que muestran la teoría corpuscular, por una parte, y la ondulatoria, por otra”³¹, frase en la que se muestra la concepción complementaria de la doble naturaleza de la luz, que Renninger pretende refutar con su experimento de 1953, diseñado con el objetivo de probar que en un único experimento se pueden revelar los dos aspectos de la luz.

30 M.Renninger, Interaction-free Measurements, 1960, *Ibid.* (p.1)

31 W.Heisenberg, Postscript del artículo de 1927, *Ibid.* (p. 83)

El carácter positivista del trabajo en el que Heisenberg derivó sus relaciones de indeterminación aparece cuando el autor, después de argumentar que dichas relaciones invalidan el principio de causalidad, manifiesta que no tiene sentido la cuestión de si, en el fondo, existe un mundo real causal bajo el mundo fenoménico acausal; no tiene sentido porque, según Heisenberg, la ciencia física se ha de limitar tan solo a describir correlaciones entre observaciones. Pero, como veremos, Heisenberg no siempre mantuvo una actitud positivista, así como vemos que tampoco mantuvo la misma actitud ante la ley de la causalidad, ya que, tres años después, señalaba³² que es posible mantener un cierto grado de determinismo en la teoría atómica, puesto que se puede aceptar una causalidad restringida en el caso de que se conozcan todos los datos de un sistema aislado y de que dicho sistema sea afectado sólo por las perturbaciones necesarias para la realización del experimento.

Las relaciones de indeterminación y sus implicaciones filosóficas tuvieron una gran repercusión. Constituyeron uno de los temas más debatidos de la polémica que mantuvieron Bohr y Einstein. Aunque Einstein había iniciado la interpretación probabilística de los fenómenos cuánticos nunca renunció al principio de causalidad en favor de una teoría estadística, puesto que consideraba que ésta era una descripción incompleta de la realidad que en un futuro sería sustituida por una teoría determinista. Para probar que la teoría de Bohr y Heisenberg no agotaba las posibilidades de explicar los fenómenos observables, Einstein argumentaba que era suficiente mostrar que un análisis riguroso de los procesos de medida llevaría a resultados que permitirían superar las relaciones de indeterminación. Por esta razón en el quinto y sexto congreso Solvay, en 1927 y 1930, Einstein desafió las relaciones de indeterminación examinando una serie de experimentos mentales que Bohr fue rechazando uno a uno. Treinta años después, Renninger presentaba su experimento IFM como un desafío, no a las relaciones de indeterminación como Einstein, sino a la justificación que Heisenberg ofrecía de las relaciones de indeterminación, basada en la acción del dispositivo de medida sobre el objeto medido.

Por otra parte, Popper propuso una interpretación estadística de las relaciones de indeterminación según la cual éstas no se han de entender como enunciados que se refieren al comportamiento de partículas individuales, como presentaba Heisenberg, sino como enunciados estadísticos. Hemos encontrado que dicha interpretación estadística también era aplicada por Popper³³ a la explicación

32 W. Heisenberg, Die Rolle der Unbestimmtheitsrelationen in der modernen Physik. *Gesammelte Werke. Serie* Series C. Berlin: Piper, (p.45)

33 K. Popper, *La lógica de la investigación científica*. Barcelona: Edit Laia, 1985, (p. 363)

de un sencillo experimento imaginario propuesto por Einstein, que constituye la base del experimento de Reninger publicado en 1953, puesto que consiste en enviar luz hacia un espejo semitransparente —que corresponde al divisor de haz del interferómetro—, el cual refleja una parte de la luz y deja pasar la restante. La probabilidad de que un fotón lo atravesara es igual a la probabilidad de que se refleje, es decir, $\frac{1}{2}$; pero si se observa, por ejemplo, que el fotón se ha reflejado, la probabilidad de repente cambia y se convierte en 0 y 1, respectivamente. Según Popper, Heisenberg interpretaba este experimento manteniendo que el proceso de medida por el cual encontramos el fotón ejerce una “clase de acción física (una reducción de los paquetes de ondas)”³⁴ desde el sitio en el que está la mitad reflejada del paquete de ondas hasta el sitio en el que está la otra mitad. Según Popper, el error de esta paradójica interpretación consiste en relacionar una onda con un solo corpúsculo. Si se interpreta que la onda está relacionada con un conjunto de corpúsculos iguales e independientes el carácter paradójico desaparece, puesto que entonces consideramos que la mitad de los fotones se transmite y la otra mitad desaparece.

Por otra parte, se ha considerado a Heisenberg positivista y operacionalista y, por ello, reponsable del fondo positivista y operacionalista de la interpretación de Copenhague³⁵. Nos preguntamos qué hay tras estas posiciones, lo exploramos y lo exponemos en los últimos apartados del capítulo dedicado al pensamiento de Heisenberg. Hemos encontrado que, como positivista, mantenía, como hemos visto, que la física había de limitarse a la descripción de las relaciones entre los observables que se perciben y que no tenía sentido especular sobre si, detrás de ellos, existe un mundo o sobre cómo es éste. Como operacionalista, mantenía que una noción física sólo tenía significado cuando se describía un procedimiento bien definido para medir la magnitud referida a dicha noción. Así, la huella de Mach es evidente en los dos trabajos fundamentales de Heisenberg, en los que presentó la mecánica de matrices y las relaciones de indeterminación, puesto que en ellos manifiesta explícitamente que se propone basar la teoría cuántica sólo en magnitudes que sean observables a través de procedimientos bien definidos. En cambio, el significado de muchos términos de la física clásica proviene de procedimientos que no siempre se pueden aplicar en mecánica cuántica con la misma precisión, porque generalmente en física clásica está justificado prescindir de la interacción con el dispositivo de medida y en mecánica cuántica, según Heisenberg, no está justificado hacerlo. Sin embargo, en las medidas cuánticas IFMs no aparece dicha interacción.

Pero Heisenberg no se mostró positivista durante toda su vida. A partir de una entrevista que

34 K. Popper, *Ibid.* (p.364)

35 H.P.Stapp, The Copenhagen Interpretation, *American Journal of Physics*, 1972, vol. 40

mantuvo con Einstein fueron creciendo en su interior las dudas sobre la adecuación del pensamiento positivista al progreso científico, llegando incluso a atacarlo. En dicha entrevista Heisenberg y Einstein habían debatido sobre la noción de trayectoria. Según Einstein, si existían las trayectorias en el macrocosmos también habían de existir en el microcosmos, puesto que la noción de trayectoria no podía depender del tamaño del cuerpo. En cambio, según Heisenberg, si no se podían observar las trayectorias no habían de ser atribuidas a las partículas, a lo cual Einstein respondía que únicamente la teoría determina lo que es observable, que todas las teorías tenían magnitudes inobservables y que el principio positivista de sólo admitir magnitudes observables no se podía llevar consecuentemente a la práctica.

Años después, encontramos a Heisenberg en la misma línea crítica ante el positivismo en que se situaba Einstein. Así, aunque la tesis positivista de que todo conocimiento está basado en la experiencia había sido útil, mantenía Heisenberg, porque le había llevado a la exigencia de clarificar lógicamente cualquier enunciado científico, esta tesis, llevada a sus últimos extremos, haría la ciencia imposible, puesto que, como señalaba Einstein, a veces el científico, para avanzar, se ve obligado a utilizar nociones que no tienen un significado claro y preciso³⁶. Incluso Heisenberg rechazaba³⁷ la insistencia de los positivistas en que la tarea del científico consiste en limitarse a predecir los resultados de los experimentos y posteriormente verificarlos. Según Heisenberg, el científico también ha de explicar los resultados de dichos experimentos mediante leyes. Todos aceptamos la superioridad de la teoría del movimiento de los planetas de Newton sobre la astronomía de Ptolomeo, a pesar de que ambas teorías ofrecen predicciones acertadas. De la misma manera, Renninger, en su artículo de 1953, no se conforma con que se interprete la onda como un recurso formal para realizar predicciones sino que pretende presentar un modelo que explique los resultados de su experimento.

Heisenberg no sólo rechazó el positivismo sino que aceptó un realismo práctico que consideraba que sería "siempre parte esencial de la ciencia natural"³⁸. Así, distinguió tres especies de realismo que denominó realismo "dogmático", realismo "práctico" y realismo "metafísico". Definió el primero como la doctrina según la cual todos los enunciados que se refieren al mundo material pueden ser "objetivados" y entendió que un enunciado puede ser "objetivado" cuando se puede hacer que su contenido no dependa de las condiciones bajo las cuales es posible verificarlo, es decir,

36 W. Heisenberg, *Física y filosofía*. Buenos Aires: La isla, 1959, (p. 74)

37 W. Heisenberg, *La parte y el todo*. Pontevedra: Ellago, 1967, (p. 266)

38 W. Heisenberg, *Física y filosofía*. Buenos Aires: La isla, 1959, (p. 62)

de las interacciones provocadas por el proceso de medida. En cambio, Heisenberg definió el realismo “práctico” como la doctrina según la cual no todos los enunciados pueden objetivarse; sólo pueden objetivarse los enunciados propios de la vida cotidiana y una parte fundamental de los de la ciencia natural. Así pues, el realismo dogmático constituye un principio fundamental de la física clásica y el realismo práctico es principio fundamental de la interpretación que Bohr y Heisenberg dieron a la mecánica cuántica, puesto que ambos autores insistían en el hecho de que las condiciones de verificación de los enunciados son esenciales, porque la interacción con el dispositivo perturba el objeto, de manera inevitable e imperturbable, y esta interacción comporta consecuencias trascendentales. Finalmente, Heisenberg consideraba el realismo metafísico como la doctrina según la cual el mundo material existe realmente.

La distinción de realismo “práctico” y realismo “dogmático” de Heisenberg nos sugiere que las IFMs de Renninger constituyen unos experimentos que comportan implicaciones significativas para la interpretación realista de los fundamentos de la mecánica cuántica, puesto que son procesos de medida que no perturban el objeto medido.

El tercer y cuarto capítulo de este trabajo están dedicados a la concepción filosófica de Einstein y de Schrödinger, respectivamente. Como representantes de la oposición a la interpretación de Copenhague, ya nos hemos referido al pensamiento de estos autores en un apartado anterior de esta introducción. Vamos a completarlo con otros resultados que también hemos encontrado en relación al tema de nuestra investigación.

Al pensamiento filosófico de Einstein está dedicado el tercer capítulo, especialmente a su concepción realista, puesto que, como hemos visto, los artículos de Renninger se sitúan en la línea realista de éste, frente a la concepción dominante, inspirada por Bohr y Heisenberg. Así, la noción de “realidad física” del artículo de Renninger de 1953 está inspirada en la noción de “elemento de la realidad física” de EPR y las propuestas que ofrece Renninger, tanto en su artículo de 1953 como en el de 1960, se encuentran en la línea de las dudas que albergaba Einstein sobre la completud de la mecánica cuántica, puesto que sus artículos presentan fenómenos empíricos que su autor cree que la teoría cuántica no contempla.

Einstein, como Heisenberg, se había inspirado durante su juventud en el pensamiento de Mach, pero

posteriormente se había apartado de las directrices positivistas de éste. Una de sus directrices era que los principios fundamentales de una teoría científica habían de constar de nociones que estuvieran muy cerca de la observación directa y Einstein en su madurez consideraba que esta condición, por ser demasiado restrictiva, impedía el progreso de la ciencia. Según Einstein, Mach, debido a su extremada adhesión a la experiencia directa, no veía la ciencia como un sistema de relaciones entre los datos de la experiencia, sino como un simple catálogo de éstos, olvidando la comprensión de la realidad, que es el auténtico objetivo del conocimiento científico.

Cuando Einstein contemplaba la teoría cuántica veía en ella una teoría no realista, como el catálogo de Mach, que sólo coordinaba los datos observados y, aunque permitía realizar con éxito predicciones probabilísticas de futuras observaciones, no le satisfacía, porque él pretendía conocer la realidad existente, independientemente de las observaciones. Así pues, Heisenberg, como hemos visto, consideraba a Einstein un realista “dogmático”, porque le atribuía la creencia de que todos los enunciados sobre el mundo material pueden llegar a ser objetivados, es decir, a referirse a los objetos del mundo sin depender de sus condiciones de observación, de la interacción provocada por el proceso de medida. Heisenberg adjudicaba a Einstein la posición de realista “dogmático” porque éste declaraba que el científico puede llegar a conocer la realidad tal como es, independientemente de las condiciones de experimentación. Asimismo, Renninger compartía la actitud realista de Einstein, puesto que, por una parte, pretendía mostrar que la onda es una realidad física y no se conformaba con la interpretación estadística de la onda, y, por otra parte, presentaba observaciones sin interacción.

Sin embargo, Einstein nunca ofreció respuesta a la pregunta ¿qué es la realidad? puesto que evitaba las cuestiones metafísicas por su carácter especulativo. Como Kant, Einstein mantenía³⁹ que las cuestiones que se refieren a la realidad en sí no pueden ser respondidas, ya que aluden a una entidad que no podemos conocer y las posibles respuestas que les demos nunca podrán ser contrastadas, porque todo conocimiento de la realidad empieza y termina con la experiencia. Así pues, hemos encontrado una raíz kantiana en Einstein, como también la hemos encontrado en Bohr y en Schrödinger. Respecto a los artículos de Renninger, tampoco hay en ellos indicios de preguntas puramente metafísicas.

La noción de “realidad física” de Renninger hemos visto que estaba inspirada en la de “elemento de

39 Según Rosenthal-Schneider, *Presuppositions and Anticipations* (Edit. Schilpp) (1949) (p.137)

la realidad física” de EPR, el artículo escrito por Einstein, Podolsky y Rosen con el objetivo de mostrar que la mecánica cuántica no describe la experiencia de manera completa. El artículo comienza⁴⁰ mostrando la posición realista de sus autores, según la cual siempre se ha de tener en cuenta la distinción entre la realidad objetiva, independiente de cualquier teoría, y los conceptos físicos con los que la teoría opera. Para que estos conceptos representen la realidad –que constituye el objetivo de la teoría– se han de corresponder con la experiencia, que en la ciencia física “toma la forma del experimento y la medida”, los cuales nos permiten “realizar inferencias sobre la realidad”.

Para que una teoría sea completa, EPR imponen una condición necesaria: *“cada elemento de la realidad física ha de tener un homólogo en la teoría física”*. Y como condición suficiente, pero no necesaria, de constituir un “elemento de la realidad física” –puesto que los autores consideran que para conseguir su objetivo no requieren una definición *“comprehensive”* de realidad–, la siguiente: *“Si sin perturbar un sistema, podemos predecir con certeza (es decir, con probabilidad igual a la unidad) el valor de una cantidad física, entonces allí existe un elemento de la realidad física correspondiente a esta cantidad física”*. Fue exactamente este último criterio el que Renninger manifestó que había inspirado su noción de “realidad física” en su experimento de 1953 para comprender cómo es la onda que acompaña el fotón.

Fine⁴¹ realizó un exhaustivo análisis del argumento de EPR que concluye con la incompletud de la mecánica cuántica. Según Fine, la estructura lógicamente opaca del artículo oscureció las ideas esenciales, que son las siguientes: consideremos dos partículas relacionadas por la ley de conservación del momento lineal total. Dichas partículas obedecen el principio de separación, propuesto por Einstein, según el cual una propiedad física de una partícula no depende de las medidas –u otras interacciones– que se efectuen en la otra cuando ambas están muy distantes en el espacio. Así, si estas dos partículas están muy alejadas y se mide el momento lineal de A entonces, por la ley de conservación del momento total, se puede inferir el momento de B. Y por el principio de separación esta propiedad había de existir en B cuando se empezó a medir en A. Si no fuera así, se habría creado en B al medir A, violando el principio de separación. Pero, según la mecánica cuántica, al iniciarse la medida en A, la función de estado del sistema de las dos partículas, A y B, no ofrece probabilidad uno para ningún valor del momento en B. Por consiguiente, la descripción

40 A.Einstein, B.Podolsky y N.Rosen, Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?, *Physical Review*, **47**, 777-80 (1935)

41 A.Fine, *The Shaky Game*, Chicago: University of Chicago Press, 1986 (p. 32)

que ofrece la mecánica cuántica es incompleta. Así, según Fine, la conclusión que ofrecen EPR no es exactamente la incompletud de la mecánica cuántica sino la incompatibilidad entre la noción de completud y el principio de separación.

En cambio, según Pais⁴², la conclusión de EPR es la incompatibilidad entre la noción de completud y la noción de realidad, puesto que EPR no inferirían que la mecánica cuántica es incompleta si su criterio de realidad hubiera permitido que dos cantidades físicas pudieran “ser consideradas como simultáneos elementos de realidad *sólo cuando pudieran ser simultáneamente medidos o predichos*”⁴³. Pero ello provocaría que la realidad de un elemento dependiera del proceso de medida. Y según EPR ninguna noción “razonable” de realidad lo podría permitir.

La consideración de que la mecánica cuántica no es completa enlaza con la cuestión de si la estadística es fundamental en dicha teoría, es decir, si ésta admite leyes causales, que según Einstein son leyes necesarias, no probabilísticas. La causalidad es⁴⁴ uno de los componentes esenciales del realismo de Einstein, para quien una teoría realista es un modelo conceptual que, con leyes causales, representa el mundo externo en el espacio y el tiempo. Este es el ideal de teoría propio de la física clásica y Einstein no cree que la mecánica cuántica lleve a la necesidad de abandonarlo. Para defender este ideal se apoya, de nuevo, en el progreso que a través de la historia ha realizado la física clásica⁴⁵, que se ha basado en el principio de que todos los hechos siguen un desarrollo causal. Entiende “desarrollo causal” en el sentido de que, dado el conocimiento de un conjunto de condiciones iniciales de un objeto, la evolución futura de dicho objeto se seguirá con certeza de las leyes matemáticas de la naturaleza y, por consiguiente, se podrá predecir.

Pero, aunque Einstein defendía la causalidad en física, era escéptico respecto a la existencia de dicha relación en la naturaleza; argumentaba que preguntar sobre la causalidad en el mundo era como preguntar sobre la realidad; son cuestiones especulativas que no tienen una respuesta contrastable. La única cuestión que es posible responder es si es mejor, más fructífera, una teoría causal que una teoría probabilística. La respuesta según Einstein era clara: es mejor una teoría causal, que permite inferir y predecir los hechos a partir de leyes estrictas. Por otra parte, vemos

42 A.Pais, *El Señor es sutil...La ciencia y la vida de Albert Einstein*. Ariel, Barcelona (1984) (p.457)

43 A.Einstein, B.Podolsky y N.Rosen, Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?, *Ibid.* (p. 780)

44 Según Fine, *Ibid.* (p. 98)

45 Lo vemos en A.Einstein y L.Infeld, *L'evolució de la física* y en A.Einstein, *La mecánica de Newton y su influencia en el desarrollo de la física teórica*

también que ésta es la actitud de Renninger en su experimento de 1953, en el que utiliza la relación de causalidad para mostrar que la onda es una realidad.

El tercer capítulo de este trabajo está dedicado a la concepción filosófica de Schrödinger que, aunque su nombre no sea mencionado por Renninger, su pensamiento ayuda a entender los artículos de Renninger, por diversas razones. En primer lugar, porque el pensamiento de Renninger tiene múltiples puntos de contacto con el de Schrödinger y de hecho se encuentran ámbos en la misma línea del debate entre los seguidores y los oponentes de la interpretación de Copenhague. Así, por una parte, en el artículo de 1953, Renninger comparte concepciones con Schrödinger, como la creencia en la realidad de la onda y la concepción de que algo que influye en el comportamiento de otra cosa no puede considerarse menos real que ésta. Por otra parte, tanto a través del artículo de 1953 como del de 1960, Renninger se dirige a los creadores y seguidores de la interpretación dominante para que tengan en cuenta sus experimentos y encontramos también que Schrödinger declara reiteradamente que sus escritos eran motivados por el deseo de responder a las manifestaciones de los defensores de la interpretación mayoritaria. En segundo lugar, la obra de Schrödinger refleja muchas de las dudas, conflictos, confusiones y paradojas que planteaba el debate que, protagonizado por Bohr y Einstein, se extendió ampliamente a los seguidores de la interpretación de Copenhague y sus oponentes. Muchas de estas cuestiones fundamentales se encuentran en la base de las inquietudes intelectuales que sentía Renninger y le estimularon a diseñar sus experimentos. Y Schrödinger no sólo expresó claramente estas cuestiones sino que sus aportaciones arrojan luz sobre las sombras que presentaba – y sigue presentando-- la interpretación de la mecánica cuántica.

El mayor logro de Schrödinger en el dominio de la física fue su aportación a la creación de la mecánica de ondas, que realizó con el objetivo de superar las dificultades que presentaba la teoría del átomo de Bohr, la cual no ofrecía ninguna descripción del sistema atómico en el tiempo intermedio entre transiciones y tan solo describía el resultado de dichas transiciones⁴⁶. Schrödinger deseaba construir una teoría que introdujera una continuidad de estados intermedios de manera que fuera gradual la transición del sistema de un estado estacionario a otro. Para ello pretendía ofrecer una imagen ondulatoria según la cual el sistema atómico fuera un sistema continuo que ejecutara vibraciones de manera análoga a como las ejecuta un cuerpo elástico. En esta nueva imagen, a los estados estacionarios de Bohr les corresponderían las vibraciones propias del sistema, pero el

⁴⁶ E.Schrödinger, *La nueva mecánica ondulatoria (1927)*, en *Heisenberg. Bohr. Schrödinger. Física cuántica*. Barcelona: Biblioteca Círculo de Lectores (p. 485)

sistema podía ejecutar muchas otras vibraciones.

Para construir su mecánica de ondas Schrödinger se inspiró en el trabajo de de Broglie, quien, buscando⁴⁷ una teoría que combinara el aspecto ondulatorio y el aspecto corpuscular de la radiación, había iniciado la mecánica de ondas. De manera similar a como trabajaba Bohr, de Broglie no se basaba en complicados análisis matemáticos sino en la intuición de ideas innovadoras y así postuló que un cuerpo que se mueve va acompañado por una onda piloto, que no transporta energía pero dirige la energía que reside en el cuerpo. Era ésta una imagen muy visual, que obedecía, según su creador, a una concepción muy realista de la naturaleza y a un deseo de representar “la unión de ondas y partículas de una manera concreta⁴⁸. Ésta es también la imagen de la onda sin energía que acompaña a la partícula con energía que muestra Renninger en su artículo de 1953, en el que asimismo el autor destaca la necesidad de mantener, en la medida de lo posible, la visualización en los desarrollos de la física.

Pero de Broglie no ofreció una ecuación que describiera la propagación de sus ondas de materia. Esto lo consiguió Schrödinger; sin embargo, la imagen ondulatoria que presentó no era tan intuitiva y visual, tan *anschaulich*, como la de de Broglie, puesto que mientras las ondas de de Broglie se propagan en el espacio de tres dimensiones las de Schrödinger lo hacen en el llamado “espacio de configuración”, cuyas dimensiones son tres veces el número de partículas del sistema. Mas la diferencia esencial entre la imagen del mundo que ofrece la teoría de de Broglie y la que ofrece la de Schrödinger es que en la primera las ondas acompañan a los puntos materiales y en la segunda los puntos materiales consisten únicamente en sistemas de ondas. Es decir, según de Broglie la naturaleza está constituida por partículas y por ondas y, en cambio, según Schrödinger la naturaleza, en el fondo, está constituida sólo por ondas.

El mayor éxito de Schrödinger en el dominio científico fue su descubrimiento de la ecuación de la función de onda. La derivó en un monumental artículo⁴⁹ publicado en 1926 en cuatro partes. Dicha ecuación fue considerada, ya en un principio, un instrumento matemático de gran poder para resolver problemas de la estructura de la materia, pero desde su aparición presentó el problema de su interpretación, es decir, del significado físico que había de atribuirse a la función de onda ψ

47 M. Jammer, *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*. New York: Tomash Publishers (1989) (p.247)

48 W. Moore, *Schrödinger, life and thought*, Cambridge University Press. Cambridge (1989) (p.185)

49 E. Schrödinger, Quantisation as a Problem of Proper Values. *Collected Papers on Wave Mechanics*. Chelsea Publishing Company. New York (1982)

creada por Schrödinger.

En el modelo de Schrödinger lo que habitualmente denominamos “partícula” constituye el “punto imagen” del grupo de ondas –del llamado “paquete de ondas”–, el punto donde se junta un continuo de formas ondulatorias que tienen la misma fase. Así, Schrödinger representaba el modelo mecánico como un modelo ondulatorio descrito en el espacio y el tiempo. Era consciente de que era difícil visualizar su modelo de ondas continuas; por ejemplo, admitía que en el interior del átomo la posición del electrón no tenía significado pero, a pesar de ello, mantenía que no hay que renunciar a la descripción espacio-temporal, ya que dicha renuncia, “desde un punto de vista filosófico”, significaría “una completa rendición”⁵⁰, puesto que no podemos evitar pensar en términos de espacio y tiempo y lo que no podemos comprender dentro del marco espacio-temporal “no lo podemos comprender en absoluto”.

Schrödinger demostró que hay una completa equivalencia matemática entre la mecánica de matrices de Heisenberg y su mecánica de ondas, a pesar de que tenían diferencias esenciales, porque la primera era una teoría del *discontinuum* –puesto que utilizaba matrices, sistemas de cantidades numéricas discretas– y la segunda era una teoría del *continuum* –puesto que presentaba “un proceso como de campo”⁵¹ regido por una ecuación diferencial parcial–. La equivalencia matemática de las dos teorías planteó nuevas cuestiones: ¿cuál es la mejor? ¿cuál hay que preferir? Por una parte, la mecánica de ondas se consideraba⁵² que ofrecía una superior *Anschaulichkeit*, claridad, porque permite una representación intuitiva y visual de los fenómenos subatómicos a través de modelos espacio-temporales; pero también presentaba un grave problema –que Schrödinger admitía⁵³– para la visualización: la función de onda ψ no se da en el espacio real sino, como hemos visto, en el espacio de configuración, lo cual es muy difícil de interpretar físicamente. Además Lorenz vió otro grave problema: en el modelo ondulatorio de Schrödinger no había la posibilidad de mantener la noción de partícula material, a la cual atribuimos una existencia permanente individual, puesto que la partícula es “comparable a un paquete de ondas que se mueve”⁵⁴ y un paquete de ondas no puede permanecer unido en el tiempo sino que se extiende y acaba dispersándose.

50 E.Schrödinger, Quantisation as a Problem of Proper Values. *Collected Papers on Wave Mechanics*. Chelsea Publishing Company. New York (1982) (p. 27)

51 E.Schrödinger, Quantisation as a Problem of Proper Values. *Collected Papers on Wave Mechanics*. Chelsea Publishing Company. New York (1982) (p. 45)

52 W.Moore *Ibid.* (p. 212)

53 E.Schrödinger, Quantisation as a Problem of Proper Values. *Collected Papers on Wave Mechanics*. Chelsea Publishing Company. New York (1982) (p. 60)

54 Carta de Lorenz a Schrödinger del 27 de mayo de 1926. *Letters on Wave Mechanics*. New York: Philosophical Library, 1967 (p. 47)

Como hemos visto, nos hemos encontrado con el hecho de que reiteradamente aparece la *Anschaulichkeit*, la claridad, la visualización, como una cualidad deseable de un modelo científico. La mayoría de los autores estudiados pretenden que sus teorías sean *anschaulich*, claras, intuitivas, visualizables. Según Forman⁵⁵, la *Anschaulichkeit* era uno de los valores de la filosofía de la vida que predominaba en el ambiente intelectual alemán de la época, en el cual se valoraba el carácter intuitivo y pictórico de las explicaciones científicas. Los físicos, quizás inconscientemente, intentaban adaptarse al *Zeitgeist* de la ideología dominante pero pensamos que posiblemente tras este intento había un conflicto intelectual interior.

Por una parte, dichos autores estudiaban procesos del dominio atómico y, por esta razón, se enfrentaban a objetos sutiles, en el sentido de que se encuentran muy alejados de la observación directa, como por ejemplo el electrón y la onda. Pero, por otra parte, dichos autores tenían un trasfondo positivista que posiblemente provenía de la influencia de Mach, por el que querían limitarse a los hechos observados, sin ser arrastrados por instintos especulativos que los alejasen de la experiencia inmediata –también vemos que Renninger destaca que sólo se refiere a *hechos experimentales* –. La reacción ante dicho conflicto interior no fue la misma.

Bohr renunció a la visualización, de la misma manera que hemos visto que había renunciado a otros supuestos de la física clásica, como la objetividad y la causalidad. Se basaba en el postulado cuántico, en el intercambio de energía que se produce en la interacción entre dispositivo y objeto. Según Bohr, dicha interacción impide crear modelos visuales e intuitivos que ayuden a comprender los procesos cuánticos; en cambio, en física clásica sí se pueden construir dichos modelos, puesto que en los procesos macroscópicos dicha interacción es despreciable y ello permite conocer el estado del objeto. Sin embargo, según Einstein y sobretodo Schrödinger, las características de los procesos cuánticos no llevan necesariamente a la renuncia a la visualización. A pesar de estas características, se pueden encontrar modelos intuitivos, que ofrezcan claridad al mundo cuántico, porque un supuesto fundamental de la ciencia es que el mundo físico, tanto el macrocosmos como el microcosmos, es inteligible. Es ésta también la actitud de Renninger, quien comienza su artículo de 1953 mostrando su insatisfacción por el hecho de que la dualidad onda-partícula habitualmente sólo sea tratada por métodos matemáticos y de ella no se ofrezcan modelos visuales. Renninger manifiesta que el objetivo de la visualización no se ha de abandonar demasiado pronto y se ha de mantener, aunque dentro de los límites necesarios; mas nunca dichos límites han de impedir

55 P.Forman , *Cultura en Weimar, causalidad y teoría cuántica, 1918-1927* Madrid: Alianza Editorial, 1984

posibles desarrollos visuales interesantes. Y precisamente el objetivo de su artículo es presentar uno de dichos desarrollos visuales.

Schrödinger comparte con Heisenberg y con Einstein la influencia del pensamiento de Mach que impregnaba el ambiente intelectual en que estos autores vivieron, pero es en Schrödinger en quien más profundamente se percibe dicha influencia, no sólo por las ideas positivistas sobre el progreso de la ciencia a las que, como ellos, Schrödinger se adhirió en un principio y de las cuales posteriormente se fue alejando, sino por la ontología monista que siempre permaneció en el fondo de su pensamiento. Por esta razón, nos hemos detenido a estudiar el pensamiento de Mach en este capítulo dedicado al pensamiento de Schrödinger.

Por otra parte, las dificultades que se presentaban para dar significado a la función de onda ψ llevaron a Schrödinger a ofrecer sucesivamente diferentes interpretaciones de ésta. Su primera interpretación fue realista; pero posteriormente aceptó la interpretación estadística de Born. Pero, a partir de la publicación de EPR y la posterior correspondencia que en 1935 mantuvo con Einstein, Schrödinger expresó sus dudas respecto a dicha interpretación y, a finales de los años 40 y a principios de los 50, manifestó una concepción propia de la mecánica cuántica que fue considerada como un retorno a su primera interpretación realista. Así pues, encontramos en Schrödinger manifestaciones realistas y no realistas sobre el significado de la función de onda. Estas oscilaciones en el pensamiento de Schrödinger muestran el grave problema que para él significaba la interpretación de la función de onda. Este problema lo encontramos también en el artículo que en 1953 publicó Renninger, quien aceptaba la interpretación no realista de Born pero a la vez mantenía una interpretación realista, puesto que pretendía probar que la onda es una realidad física.

Schrödinger también sometió⁵⁶ a un riguroso análisis conceptual la noción de “partícula elemental”. Llegó a la conclusión de que ésta ha perdido las características que le eran propias en la física anterior porque en mecánica cuántica la partícula “carece de identidad”, es decir, no puede considerarse un objeto concreto e identificable que disponga del carácter de individualidad que otorgamos a un cuerpo macroscópico. Derivó su conclusión a partir de dos concepciones; la primera es la doble naturaleza, ondulatoria y corpuscular, de la materia y la segunda es la indeterminación que, debido a la interacción entre dispositivo y objeto, se da en toda medida. Vemos que, por otra

56 E. Schrödinger, *¿Qué es una partícula elemental?* en *¿Qué es una ley de la Naturaleza?* México: FCE, 1975 (p. 164)

parte, ambas concepciones constituyen los dos temas fundamentales que Renninger abordó en sus dos artículos.

Por otra parte, vemos que, ante la sutileza de las partículas cuánticas, una cuestión epistemológica general que se plantea la física atómica es: ¿podemos concebir observaciones virtuales en las cuales basar la “existencia real”⁵⁷ de los objetos de la física? La respuesta que propone Schrödinger es que podemos aceptar la existencia real de una entidad si observamos el efecto a través del cual ésta se manifiesta⁵⁸. Y precisamente esta propuesta de Schrödinger es la que utiliza Renninger en su experimento de 1953 para justificar la realidad física de la onda, de la onda “virtual”, la onda que De Baere denomina “vacía”.

Según Schrödinger, si una teoría científica presenta una imagen del mundo en la que quedan dominios vacíos, lo que hay que hacer es construir una nueva imagen que no contenga dichos dominios. Por ejemplo, las relaciones de indeterminación impiden crear algunas construcciones mentales, puesto que prohíben realizar ciertas observaciones exactas, pero esto no significa que impidan crearlas todas. Así, según Schrödinger, no hay que prescindir de las imágenes intuitivas, de los esquemas visualizables⁵⁹, porque son los que dan carácter de inteligibilidad al mundo, uno de los rasgos esenciales de la visión del mundo que ofrece la ciencia. Como hemos dicho, encontramos en el trabajo de Renninger de 1953 la misma valoración de la visualización, de la *Anschaulichkeit*.

El requerimiento de inteligibilidad y objetividad ya había sido destacado por Platón como características esenciales del conocimiento científico como opuesto al conocimiento vulgar, al que consideraba conocimiento sensorial y subjetivo, basándose en la concepción de que la ciencia es construida a través de la razón, que, por una parte, permite entender la experiencia y, por otra, constituye una facultad universal, común a todos los seres humanos. Pero el requerimiento clásico de objetividad comporta graves dificultades en la mecánica cuántica, de las cuales, como hemos visto, la más destacada por la escuela de Copenhague es que para observar un objeto el sujeto ha de entrar en contacto con él⁶⁰ a través de un dispositivo que provoca una perturbación que nunca es

57 E. Schrödinger, *¿Qué es una partícula elemental ?* en *¿Qué es una ley de la Naturaleza?* México: FCE ,1975 (p. 121)

58 E. Schrödinger, *¿Qué es una partícula elemental ?* en *¿Qué es una ley de la Naturaleza?* México: FCE ,1975 (p.124)

59 E. Schrödinger, *¿Qué es una partícula elemental ?* en *¿Qué es una ley de la Naturaleza?* México: FCE ,1975 (p. 132)

60 E. Schrödinger, *¿Qué es la vida? La ment i la matèria* Barcelona: Edicions 62, 1967 (p. 168)

despreciable; de dicha dificultad tal escuela infiere que hay propiedades del objeto que nunca serán comprendidas, lo cual va contra la inteligibilidad de la naturaleza, primera característica de la ciencia. Sin embargo, Schrödinger no aceptaba que la dificultad que comportaba la interacción implicara necesariamente renunciar a los principios clásicos del conocimiento científico. Y aquí encontramos de nuevo el alcance de las IFMs, las medidas sin interacción, en el marco de la comprensión de los fenómenos cuánticos.

Por otra parte, a partir de la ineludible e incontrolable interacción entre el sujeto y el objeto, la escuela de Copenhague infería la consecuencia epistemológica de que no hay frontera entre sujeto y objeto. Ante ella Schrödinger respondía con su ontología monista: no existe esta frontera⁶¹ y nunca ha existido, ni en la física clásica ni en la física cuántica, puesto que no hay diferencia entre sujeto y objeto. Esta respuesta, cercana al monismo védico, doctrina que identifica el todo con el alma y con la divinidad, aparecía ante la comunidad científica de la época como mística y acientífica. Por esta razón pensamos que la respuesta de Schrödinger contribuyó a la aureola de misticismo que ha rodeado la divulgación popular de la teoría cuántica⁶².

A continuación, en el capítulo quinto, cambiamos la perspectiva de nuestra exploración para acercarnos al marco social, al ambiente intelectual de la época en que se forjaba la interpretación de la mecánica cuántica, puesto que muchas de las cuestiones que se discutían en el debate –del que surgieron las IFMs de Renninger– que enfrentaba los seguidores de la interpretación de Copenhague y sus oponentes eran, como hemos visto, sobre realismo, causalidad, inteligibilidad de la naturaleza, posibilidad de visualización de los modelos científicos, es decir, eran cuestiones que no se pueden responder de manera precisa ni por vía argumentativa ni empírica. Por tanto, el debate se prolongaba en el tiempo sin llegar a ningún acuerdo y nunca concluía, ni ha concluido aún. Así, las respuestas a estas cuestiones, que eran básicamente epistemológicas, dependían en gran medida del trasfondo filosófico personal de cada físico. Dicho trasfondo es para el pensamiento de un científico como una corriente subterránea⁶³, que no se percibe directamente pero afecta a sus pensamientos conscientes. Y pensamos que en su trasfondo conceptual influye el ambiente en el que vive y trabaja un físico.

61 E. Schrödinger, *Què és la vida? La ment i la matèria* Barcelona: Edicions 62, 1967 (p. 170)

62 W. Heisenberg, E. Schrödinger, A. Einstein *et alt.* *Cuestiones cuánticas. Escritos místicos de los físicos más famosos del mundo* Edit. Kairós (Barcelona) es un ejemplo de esta línea de divulgación

63 M. Jammer escribe "...el efecto de las consideraciones filosóficas en la mente de los físicos se parece más a una corriente subterránea que a una línea conductora patente y bien definida" *The Conceptual Development of Quantum Mechanics* (p.166)

Así, Schrödinger de manera explícita reconocía que “hay numerosas líneas de actividad que resultan atractivas porque son la moda del momento, sea en arte, en política o en ciencia, y se dejan sentir también en la ciencia 'exacta' que es la física”⁶⁴, lo cual muestra cuán dependiente es la ciencia del marco intelectual que está de moda en la época de la cual forma parte; pero esta dependencia no es evidente de inmediato⁶⁵ puesto que “cuando vivimos inmersos en el período cultural es difícil percibir”⁶⁶ el espíritu del ambiente social. Según Forman, en el ambiente intelectual de los círculos cultos germanoparlantes de la época en la que se construía la interpretación de la teoría cuántica, dominaba un pensamiento antirracionalista y antimecanicista en el que los presupuestos realistas estaban muy desprestigiados, especialmente el determinismo. Así, la moda intelectual de la época facilitó el abandono de la causalidad por parte de muchos físicos. Entre los que hemos estudiado, hemos visto que Bohr y Heisenberg realizaron manifestaciones contra la noción de causalidad; pero, en cambio, Einstein la defendió –Renninger la utilizó– y en Schrödinger⁶⁷ encontramos manifestaciones en los dos sentidos. Estos casos constituyen ejemplos que muestran que los factores sociológicos condicionaron pero no determinaron completamente el pensamiento de los físicos creadores de la interpretación de la mecánica cuántica.

La segunda parte del trabajo: los experimentos de Renninger

La segunda parte del trabajo, que constituye el capítulo sexto, está dedicada a exponer los resultados de la investigación que hemos efectuado sobre los dos artículos de Renninger, es decir, sobre el análisis de su contenido, que nos ha llevado a ver que contienen auténticas IFMs, las primeras que hemos encontrado, así como sobre el contexto de otros trabajos en el que surgieron y las repercusiones que tuvieron, a partir de las pocas referencias que a ellos hemos encontrado. Finalmente, el sexto y último apartado contiene un acercamiento a la continuación que los experimentos de Renninger han tenido en posteriores dispositivos reconocidos como IFMs

El primer apartado está dedicado a la teoría cuántica de la medida porque es en el contexto de las aportaciones a esta teoría donde encontramos referencias a los artículos de Renninger, puesto que el objetivo de éstos consiste en describir e interpretar experimentos sobre medidas –aunque sean medidas sin interacción–. El proceso de medida es muy significativo en la mecánica cuántica,

64 E. Schrödinger, *¿Es la ciencia una moda de los tiempos?* en *Science and the Human Temperament* (p.100)

65 F.Selleri, *El debate de la teoría cuántica* Madrid: Alianza Edit (1986) (p.51)

66 E.Schrödinger, *¿Es la ciencia una moda de los tiempos?* en *Science and the Human Temperament* (p.105)

67 F.Selleri, *Ibid.* (p.54)

puesto que debido al orden de magnitud de las dimensiones cuánticas, no se puede omitir la perturbación que en el objeto provoca la interacción con el instrumento de medida. Esta interacción tiene, según la interpretación de Copenhague, profundas implicaciones filosóficas. Así pues, como hemos visto en los cuatro primeros capítulos, especialmente en el dedicado a la concepción filosófica de Bohr y Heisenberg, la interacción entre objeto y dispositivo está en corazón de la mecánica cuántica. De ahí la trascendencia de las IFM, en las que se produce medida sin interacción.

La teoría cuántica de la medida presenta un problema de inconsistencia, el denominado problema de la medida, del colapso o de la reducción, porque los vectores de estado, que caracterizan los posibles estados de un sistema y se representan como superposiciones de dichos estados, evolucionan a través del tiempo, de forma continua, causal y termodinámicamente reversible, siguiendo la ecuación de Schrödinger, pero cuando se realiza una medida, que constituye un proceso natural más, entonces el sistema cambia instantáneamente, de forma discontinua. Este cambio, denominado el colapso o la reducción –porque los posibles resultados de la medida se reducen a uno solo, el que es observado– sigue las leyes de la probabilidad, basándose en la regla de Born. Así, según von Neumann, los sucesos que tienen lugar en la parte observada del mundo, en tanto ésta no se encuentra en interacción con la parte que observa, se describen por medio del proceso continuo y causal regido por la ecuación de Schrödinger, pero cuando “existe una interacción, es decir, una medición”⁶⁸ ésta se ha de describir mediante el proceso discontinuo y probabilístico del colapso. El problema de la medida constituye uno de los retos más acuciantes de la mecánica cuántica.

Por otra parte, por consistencia, von Neumann, al estudiar la medida, consideraba que se había de tener en cuenta el hecho de que el instrumento también obedeciera las leyes cuánticas. Por consiguiente, para observar este dispositivo se necesitaría otro segundo dispositivo y para observar el segundo se necesitaría un tercero y así sucesivamente. Así pues, esta propuesta llevaría a una regresión infinita; pero, en cambio, una medida es una operación finita. Por tanto, el proceso que lleva a la medida ha de constituir un acto discontinuo y no causal, que, según von Neumann, ocurre en la conciencia del observador. Y, en la línea del positivismo, von Neumann manifestaba que la descripción que la mecánica cuántica ofrecía de la medida no consistía en que “una magnitud física tiene un valor determinado” sino en que un sujeto observador “ha llevado a cabo un determinado

68 J.Von Neumann, *Los fundamentos matemáticos de la Mecánica Cuántica* . Madrid: CSIC (1991) (p.299)

acto de percepción (subjetivo)”⁶⁹.

Mas la teoría de la medida de von Neumann, contenida dentro de su presentación axiomática de los fundamentos de la mecánica cuántica, no era fácilmente accesible por el alto nivel de conocimiento matemático que requería y, por esta razón, fue presentada de forma más simple por London y Bauer, quienes destacaron la tesis de que lo que produce el colapso, la reducción del vector de estado, es la conciencia. Ésta es también la tesis que desarrolló Wigner, según la cual el momento determinado en el que se produce la reducción es el instante en el que el sujeto toma conciencia de su observación. La justifica con el argumento siguiente: si consideramos que el objeto cuántico está en superposición de estados entrelazados con el dispositivo de medida y consideramos que el sistema objeto-dispositivo también está en superposición de estados, entonces el cerebro del observador se entrelaza con el sistema objeto-dispositivo de manera que el sistema total objeto-dispositivo-cerebro también se encuentra en superposición de estados. Sin embargo, no podemos aceptar que la conciencia se encuentra en superposición de estados, puesto que en nuestra vida cotidiana no percibimos tal superposición sino que tan solo percibimos un solo resultado en cada observación. Para ilustrar su argumento, Wigner propone sustituir el experimento del gato de Schrödinger⁷⁰ por otro experimento más inofensivo, el del “amigo de Wigner”, que se encuentra en una habitación donde hay un dispositivo que envía una señal luminosa en caso de que un átomo radiactivo se desintegre. Así, el hecho de que el amigo enviara la señal luminosa mostraría que el átomo se había desintegrado y, según Wigner, ello significaba que el vector de estado se reducía cuando el amigo tomaba conciencia de la luz.

Aunque inobjetable desde el punto de vista lógico, la teoría de la medida de von Neumann recibió diversas críticas; una de ellas fue presentada por Daneri, Loinger y Prosperi, quienes la acusaban de estar basada en una filosofía subjetivista. Estos autores consideraban que se había de seguir un camino opuesto al de von Neumann, que le había llevado al subjetivismo, porque la física había de ser una ciencia objetiva⁷¹ y, por esta razón, la mecánica cuántica, como teoría física, había de limitarse a describir los cambios inducidos por los microobjetos en las macropropiedades de los

69 J.Von Neumann, *Los fundamentos matemáticos de la mecánica cuántica* . Madrid: CSIC (1991) (p. 299)

70 Que se ha considerado en el apartado del gato de Schrödinger del capítulo dedicado al pensamiento de este autor

71 Como mantenía Schrödinger (como veremos en el apartado de la imagen del mundo que ofrece la ciencia natural), quien consideraba que objetividad e inteligibilidad eran los principios básicos sobre los que se construía la ciencia natural y los descubrimientos que se habían efectuado en el mundo cuántico no ofrecían motivos suficientes para renunciar a ellos.

dispositivos de medida en términos objetivos y universales⁷². Daneri, Loinger y Prosperi propusieron el modelo siguiente: considerando que el aparato de medida es un macrosistema que se encuentra en un estado termodinámicamente metaestable, la interacción del objeto atómico con el dispositivo es un desencadenante que provoca una reacción macroscópica en el aparato que hace que éste evolucione hasta un estado de equilibrio estable en el que aparece el resultado de la medida que observamos.

Mas este modelo, según el cual la parte microscópica del proceso de medida era el detonante de una amplificación en el aparato macroscópico de medida que llevaba al resultado observado, no se podía aplicar a una especie de medidas, las más sorprendentes de las cuales eran, según Jauch, Wigner y Yanase, las “medidas de resultado negativo” que había presentado Renninger en 1960, puesto que en ellas se efectuaba colapso sin que hubiera ninguna perturbación que provocara un proceso desencadenante microscópico. Por esta razón, este trabajo de Renninger tenía gran significación en la teoría cuántica de la medida. Sin embargo, Jauch, Wigner y Yanase no mencionaron el anterior trabajo de Renninger, publicado en 1953, en el que también se realizaba una observación, esto es, un colapso, una reducción, sin que hubiera perturbación, es decir, interacción. Sólo Jammer⁷³ menciona, expone y valora el contenido de ambos artículos.

El hecho de que Renninger (1905-1987) no fuera conocido en el ámbito de la teoría cuántica nos llevó a buscar el porqué. Lo encontramos al conocer que, como manifiesta⁷⁴ en una carta a Einstein, el dominio de su trabajo profesional estaba muy alejado de la física teórica, puesto que su especialidad era la interferencia de rayos X en el ámbito de la cristalografía, en el que publicó casi sesenta artículos. Esta circunstancia creemos que influyó en la prudencia y cautela con la que vemos, en los dos artículos estudiados, que expuso sus tesis, que se oponían a las de la interpretación dominante en mecánica cuántica; pero, por otra parte, es indudable que su práctica profesional cotidiana le permitió disponer de la habilidad y la pericia necesarias para imaginar y preparar mentalmente con precisión sus experimentos ópticos.

El objetivo que Renninger manifiesta en su artículo de 1953 es mostrar a través de un experimento mental que una partícula cuántica lleva asociada una onda que es una auténtica realidad física, que

72 No en términos subjetivos y particulares, porque la ciencia está construida sobre el dominio del λόγος, la razón compartida por todos.

73 M.Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, New York: J.Wiley & Sons, 1974 (p.494-496)

74 Carta del 30-5-1953

se desplaza en el espacio y el tiempo y no es un simple instrumento matemático para calcular la probabilidad de encontrar dicha partícula en un lugar determinado. Aunque ya había sido estudiado matemáticamente, Renninger pretende ofrecer de este tema un modelo visual e intuitivo que se derive tan solo de la experiencia. Para ello utiliza una noción de “realidad física” inspirada en la noción de “elemento de la realidad física” de EPR: “La noción de 'realidad física' ha de entenderse de tal manera que, cuando esta realidad física se considera en un espacio particular en un tiempo particular, ha de ser experimentalmente posible influir en esta realidad de manera que los futuros resultados de experimentos muestren de forma inambigua que esta realidad ha sido causalmente influida por el acto experimental en este espacio y en este tiempo”⁷⁵. El paralelismo de Renninger(1953) con EPR es, pues, patente desde el principio. Ambas nociones, referidas a la realidad abstracta, fueron creadas para ser usadas empíricamente, es decir, para extraer consecuencias epistemológicas a través de experimentos. La cercanía del autor a la línea de pensamiento de los oponentes a la interpretación de Copenhague es patente también desde el principio. Así, Renninger pretende probar la hipótesis de de Broglie: hay una onda que acompaña a la partícula. Para probarla utiliza la noción de causa –que Einstein considera muy fecunda y productiva para la explicación científica–, puesto que, aunque la onda no sea directamente observable, los efectos a través de los cuales se manifiesta sí son observables –como hemos visto que mantenía Schrödinger–, quien manifestaba que podemos aceptar la existencia de una entidad si observamos sus efectos.

También desde el principio es patente la oposición de Renninger a las tesis de la interpretación mayoritaria, pues se manifiesta contra la noción de complementariedad de Bohr, según la cual se necesitan dos experimentos diferentes, mutuamente excluyentes, para mostrar la naturaleza corpuscular y la naturaleza ondulatoria de la luz. Renninger, en cambio, pretende “revelar en una única e indivisible intervención experimental las dos imágenes de la naturaleza de la luz”⁷⁶. Se dirige a Jordan que manifiesta que “es imposible que un solo acto experimental muestre los dos aspectos de la luz”⁷⁷ y a Heisenberg que mantiene que la noción de onda y la de partícula son demasiado diferentes para que una cosa pueda ser “una forma de movimiento ondulatorio y estar compuesta de partículas al mismo tiempo”⁷⁸. Así, para Heisenberg la onda es una analogía⁷⁹ utilizada para describir aquello para lo que nuestro lenguaje no tiene palabras; en cambio, para

75 M.Renninger, (1953) (p.1)

76 M.Renninger, (1953) (p.4)

77 M.Renninger (1953) (p.1)

78 W.Heisenberg, *The Principles of Quantum Theory, Ibid.* (p. 10)

79 W.Heisenberg, *The Principles of Quantum Theory, Ibid.* (p.10)

Renninger es una entidad real existente.

Con el objetivo de mostrar que la onda es una realidad, Renninger, en su artículo de 1953, presenta un experimento que constituye una auténtica IFM, porque, en un 25% de los casos en que se envía un fotón por el interferómetro puede revelar la existencia de un objeto interpuesto sin que dicho fotón interactúe con él. Es el mismo experimento que Elitzur y Vaidman publicaron cuarenta años después. Pero el de estos últimos ha sido reconocido como IFM y, en cambio, el de Renninger, no. El motivo es que, como hemos visto, Renninger no pretendía realizar una IFM sino mostrar que la partícula cuántica es acompañada por una onda real.

En cambio, en su artículo de 1960 Renninger es plenamente consciente de que presenta una medida sin interacción. El dispositivo consiste en una primera pantalla en forma de casquete esférico que tiene un hueco y que está rodeada por una segunda pantalla que tiene forma de esfera completa. El experimento consiste en enviar un fotón desde un punto interior a la primera esfera. Entonces, el destello en la primera pantalla “es equivalente”⁸⁰ a la “reducción de la función de onda” porque en este caso la probabilidad de que el fotón alcance la segunda pantalla se anula. Es la situación que ocurre habitualmente. Pero si no se produce ningún destello en la primera pantalla también hay “reducción de la función de onda”, porque en este segundo caso la probabilidad de que el fotón alcance la segunda pantalla es la unidad; por tanto, en esta situación se produce una medida, un colapso, sin interacción con el objeto.

Así, el autor manifiesta⁸¹ que su objetivo es mostrar que existen procesos de medida que no afectan al sistema medido, es decir, que, como las medidas habituales, permiten realizar aserciones sobre el objeto porque “reducen” su función de onda pero, al contrario de éstas, no lo alteran. Por consiguiente, el experimento de Renninger tiene implicaciones muy significativas para la interpretación de la mecánica cuántica, puesto que se dirige al corazón de la interpretación de Copenhague, ya que muestra que no está justificada la necesidad de que cada proceso de medida perturbe el objeto, lo cual constituye un contraejemplo del enunciado de la inevitabilidad de la interacción entre dispositivo y objeto, es decir, de la interpretación del postulado cuántico que hemos encontrado reiteradamente en los textos de Bohr y Heisenberg. Mas la consecuencia⁸² que explícitamente extrae Renninger de su experimento se refiere a otra de las tesis de la interpretación

80 M .Renninger (1960) (p.1)

81 M .Renninger (1960) (p.1)

82 M.Renninger (1960) Abstract

de Copenhague, a las relaciones de indeterminación, que hemos encontrado a menudo en los textos no sólo de Bohr y de Heisenberg, sino también de Schrödinger y de Einstein. Pero Renninger no mantiene que su experimento sea un contraejemplo de dichas relaciones, que él acepta y utiliza en los dos artículos estudiados, sino de la justificación que de ellas se presenta habitualmente, que es la que hemos visto que ofrece Heisenberg⁸³, según el cual las relaciones de indeterminación se basan en la inevitable acción del proceso de medida sobre el sistema medido.

Renninger propone sustituir la anterior justificación por otra explicación más general, que él considera “la justificación real”, basada en una imagen ontológica realista del mundo. Así, según Renninger, la justificación de las relaciones de indeterminación es la continua influencia que sobre el objeto ejerce toda la materia del entorno, cercano y lejano, tanto si forma parte del dispositivo de medida (que es la única que tenía en cuenta la justificación que ofrecía la interpretación de Copenhague) como si no forma parte. Es decir, en la imagen del mundo que presenta Renninger la indeterminación afecta a todos los entes, pero no por la interacción con el proceso de medida sino por la influencia de toda la materia del universo.

Renninger también se opone al punto de vista de Brillouin⁸⁴, quien basa sus tesis antirealistas en la perturbación del objeto por el proceso de observación. La objeción de Renninger constituye el argumento siguiente: como muestra el experimento que presenta, dicha perturbación del objeto no es necesaria; por consiguiente, en ella no pueden fundamentarse aquellas tesis. Por esta razón nos detenemos en el principio de neguentropía que formuló Brillouin, sobre el cual levantó sus tesis. Este principio enuncia que la cantidad de información que ofrece una observación es igual o inferior al incremento de entropía del dispositivo. A partir de su principio, Brillouin infería que a un aumento infinito de precisión en la observación, es decir, a un aumento infinito de información, correspondería una infinita cantidad de energía degradada, lo cual es imposible. Esta conclusión implicaba profundas consecuencias filosóficas, porque según Brillouin al observar un objeto lo perturbamos; ello hace que no podamos conocer las leyes que actúan sobre él –es decir, no podamos aplicar la relación de causalidad, sólo podemos establecer correlaciones, como mantienen los positivistas– incluso ni podamos atribuir al objeto existencia material objetiva, en contra de los dos principios fundamentales sobre los que, según Schrödinger⁸⁵, la inteligibilidad y la objetividad del mundo, se apoya la ciencia.

83 W.Heisenberg, *Física y filosofía*, *Ibid.* (p.38)

84 L.Brillouin, Information theory and its applications to fundamental problems in Physics, *Nature*, 1959, **183**, 501

85 E.Schrödinger, *La singularidad de la imagen del mundo de la ciencia natural* (p.45)

A continuación nos detenemos en la perspectiva que del último experimento de Renninger ofreció de Broglie, quien también citó el artículo de 1953, pero sin mencionar que en él Renninger pretendía probar la imagen de la onda guía que él mismo había creado. La opinión de de Broglie constituye la referencia más significativa a la aportación de Renninger, entre las publicaciones que hemos consultado de los físicos teóricos de la época. De Broglie cita a Renninger dentro de su crítica general a la interpretación dominante, crítica que puede realizar desde el interior de dicha interpretación porque, durante un largo período de tiempo, la había aceptado. Ahora de Broglie acusaba a la interpretación de Copenhague de haber renunciado demasiado fácilmente a ofrecer una imagen inteligible de los fenómenos cuánticos, lejos del espíritu de la ciencia, caracterizado, como mantenía Schrödinger, por los supuestos de la inteligibilidad y la objetividad del mundo. De Broglie, para defender su posición realista, señalaba que a todos nos es difícil no admitir la existencia de una realidad física, aunque no se la pudiera observar, y destacaba que incluso los mismos físicos que defendían la interpretación estadística –que él calificaba de positivista porque estaba basada en el supuesto de que lo que no es observado no existe– hablaban de la probabilidad de “encontrar” los electrones, como si fueran realidades. Además, de Broglie consideraba que la noción de complementariedad, por su imprecisión, no aportaba nada a la solución de problemas con los que frecuentemente se la relacionaba, como la doble naturaleza de la luz. Así, en un experimento de interferencia se observan los dos aspectos de la luz, puesto que las franjas muestran la interferencia de las ondas y los puntos que constituyen cada franja muestran la existencia de las partículas. Recordemos que éste era también el punto de vista que sostenía Renninger en su artículo de 1953.

Por otra parte, de Broglie consideraba el experimento de Renninger de 1960 como paralelo al experimento mental de la caja que contiene una partícula en su interior y es dividida en dos partes, que son separadas y transportadas a dos lugares muy alejados, como por ejemplo Tokio y París. Según de Broglie, si en Tokio se observa que no está la partícula (lo que constituye una medida de resultado negativo como la del experimento de Renninger de 1960) es porque ya se encontraba en París antes de realizar el experimento en Tokio, no porque, como mantiene la interpretación de Copenhague –según la versión de de Broglie--, el hecho de observar la partícula en Tokio haga que la partícula se encuentre en París. Es absurdo decir que el hecho de no observar nada provoque la localización de la partícula a muchos kilómetros.

También cabe señalar que Heisenberg había leído el trabajo de Renninger antes de su publicación y,

habiéndole éste pedido su opinión, Heisenberg le respondió presentándole la objeción⁸⁶ de que el experimento de Renninger no es una auténtica medida sin interacción, ya que la posibilidad de interferencia ya constituye una interferencia. Así pues, según Heisenberg, si no hubiera la posibilidad de que el fotón chocara con la primera pantalla del dispositivo, por ejemplo, en el caso de que ésta no existiera, no habría reducción de onda. Esta respuesta de Heisenberg constituye en esencia la propuesta que ofrece Epstein –quien manifiesta que ya la había presentado Bohr en su respuesta a EPR– para interpretar un experimento que imaginó y que es similar al de Renninger(1953). Nos detenemos en su trabajo porque utiliza un dispositivo como el de Renninger(1953) y trata el tema de las medidas sin interacción como el de Renninger(1960). Así, el montaje de Epstein es también el interferómetro Mach-Zehnder del primero; la única diferencia es que en el de Epstein los espejos tienen la posibilidad de moverse, lo que significa que si retroceden es debido al impacto del fotón; es decir, los espejos móviles constituyen detectores del paso de los fotones –como el objeto absorbente, o sea, la pantalla opaca o la lámina, de Renninger(1953)–, puesto que indican el camino por el que éstos se desplazan. Por consiguiente, en el dispositivo de Epstein el hecho de que el espejo móvil no retroceda significa la reducción de la función de onda del fotón. Pero Epstein no interpreta esta observación negativa a la manera de Renninger, es decir, como una medida sin interacción, puesto que para él la posibilidad de retroceso del espejo, es decir, la posibilidad de la medida, es ya una razón suficiente para el cambio de estado del fotón.

Seguidamente, hemos realizado un ejercicio de interpretación y hemos pensado, a la luz de nuestro estudio de los textos de Bohr, Einstein, Heisenberg y Schrödinger, cómo contemplarían estos cuatro autores los experimentos de Renninger, puesto que todos ellos hicieron significativas aportaciones para responder a las cuestiones que planteaba la interpretación de la mecánica cuántica, algunas de las cuales son también las mismas que Renninger pretendía contribuir a clarificar y todos ellos extrajeron consecuencias epistemológicas de los experimentos mentales pertinentes.

El último apartado del trabajo está dedicado a posteriores desarrollos de IFMs que continuaron el germen de los experimentos de Renninger. El primero fue el de Elitzur y Vaidman que, sin conocer el trabajo de Renninger(1953) diseñaron un dispositivo como el de éste para detectar un objeto sin que la luz incidiera sobre él. Además justificaron el desarrollo del fenómeno con el formalismo del vector de estado del fotón y pensaron un procedimiento para incrementar el rendimiento hasta un 50%. Posteriormente, Penrose, quien considera las IFM como uno de los auténticos misterios de la

86 M.Renninger (1960) Epílogo (p.3)

mecánica cuántica, ofreció una nueva versión inspirada en el hecho de que Elitzur y Vaidman, para dar más dramatismo a su experimento, habían imaginado que el objeto interpuesto en el interferómetro era una bomba que podía ser defectuosa (es decir, que podía no explotar en las condiciones en las que había de hacerlo). Entonces el problema consistía en averiguar si no era defectuosa sin que el impacto del fotón provocara su explosión. Así pues, el objetivo de esta nueva versión del experimento IFM es encontrar, entre una cantidad de bombas cuestionables, una bomba que esté garantizado que no es defectuosa, teniendo en cuenta que una bomba defectuosa es aquella cuyo detonador está atascado.

Según la física clásica, la única manera de saber si el detonador está atascado es intentar moverlo. Si se consigue moverlo entonces se tiene la seguridad de que la bomba no es defectuosa, pero entonces explota. Mas, según la mecánica cuántica, sí se puede saber sin mover el detonador. Para ello se colocan en el interferómetro, en lugar de los dos espejos fijos del experimento de Renninger, dos espejos móviles, como hemos visto en el experimento de Epstein, y se une la bomba cuestionable a uno de los espejos. Así, cuando penetra el fotón en el interferómetro, si la bomba es defectuosa, como el detonador está atascado, el espejo no se mueve. Nos encontramos en la situación habitual, en la que el fotón sale por el detector D_1 . Pero si la bomba no es defectuosa hay la posibilidad de que el fotón vaya por el otro camino y llegue al detector D_2 , que es el que habitualmente está oscuro. Entonces se sabe que la bomba no es defectuosa sin que explote. Es una IFM. Recordemos que Epstein interpretaba la ausencia de respuesta en el espejo como una interferencia, de la misma manera que Heisenberg interpretaba el experimento de Renninger(1960).

Finalmente, nos acercamos a los desarrollos tecnológicos de Herzog, Kwiat, Weinfurter y Zeilinger, quienes, con la aplicación del efecto Zenón cuántico a las IFMs, han conseguido aumentar el rendimiento de estas medidas hasta casi el 100%.

Metodología

Nos acercamos a las IFMs a través del artículo de Elitzur y Vaidman(1993) –que diseñaron el experimento tal como hemos visto al principio de esta introducción– y los de Kwiat, Weinfurter y Zeilinger(1995 y 1996). Estos trabajos nos motivaron a buscar, por una parte, los orígenes de tales experimentos y, por otra parte, sus implicaciones filosóficas. En el segundo artículo se menciona el

trabajo de Renninger(1960), por presentar una medida de un sistema cuántico sin perturbación, y el experimento de Renninger(1960) nos llevó al de Renninger(1953), que, a pesar de ser casi idéntico al de Elitzur y Vaidman, no aparece citado en las referencias de las IFMs actuales. Descubrimos que los dos artículos de Renninger presentaban un carácter filosófico que los situaba en el centro del debate sobre el significado del formalismo de la mecánica cuántica, puesto que el autor mostraba sus nuevos experimentos para que los seguidores de la interpretación de Copenhague reconsideraran sus tesis sobre la complementariedad onda-partícula y la interacción objeto-instrumento. Por ello y porque Renninger pretendía mostrar empíricamente el modelo de onda guía de de Broglie y utilizaba la noción de elemento de realidad física de EPR, vimos que Renninger estaba situado en el lado de los oponentes de la interpretación dominante.

Respecto a las implicaciones filosóficas de las IFMs encontramos propuestas en Elitzur y Vaidman(1993), quienes sugieren, para eliminar su carácter paradójico, explicarlas en el marco de la interpretación de los múltiples mundos, y en Kwiat, Weinfurter y Zeilinger(1996) quienes simplemente manifiestan que las aplicaciones tecnológicas de dichos experimentos serán muy significativas en un futuro pero más lo serán sus consecuencias filosóficas.

Por otra parte, establecimos contacto con De Baere, quien había traducido al inglés los dos artículos de Renninger y nos manifestó su creencia de que los experimentos de Renninger eran originales, de propia creación. De Baere es autor de diversos artículos en los que se refiere al experimento de Renninger(1953). Así, en su artículo de 2005 presentaba dicho experimento como objeción a la noción de complementariedad de Bohr y en apoyo del modelo de de Broglie y en 2007 lo presentaba como apoyo del programa realista de Einstein, frente a Zeilinger, quien había realizado manifestaciones antirealistas. Vimos que De Baere estudiaba exhaustivamente el experimento de Renninger(1953) y sus implicaciones filosóficas, pero sólo como un experimento que probaba la realidad de la onda, no como una IFM. Sin embargo, puesto que el experimento de Renninger(1953) presentaba también la observación de un objeto sin que un solo fotón lo tocara, vimos que constituía una IFM, es decir, que era como el de Elitzur y Vaidman, que había sido unánimamente reconocido como tal.

A continuación, penetramos en el debate de principios del siglo XX sobre la filosofía de la mecánica cuántica. En primer lugar, abordamos los textos originales de Bohr, que en principio nos presentaron dificultades por la oscuridad de su estilo. Los más significativos, para entender el papel

que para Bohr representaba la interacción entre dispositivo y objeto y así descubrir el alcance filosófico de las IFMs, fueron sus ensayos recogidos en *La teoría atómica y la descripción de la Naturaleza*. De los estudios sobre Bohr el más útil fue la obra de Murdoch, *Niels Bohr's philosophy of physics*. Además, en el Instituto Bohr de Copenhague nos proporcionaron todas las fuentes y la información sobre Bohr que requerimos y en la Royal Library de Copenhague encontramos la obra *The Problems of Philosophy*, de Høffding, el mentor de Bohr, en la que el autor exponía su teoría epistemológica, que fue recogida por su discípulo. Así, leer a Høffding era como leer a Bohr, pero con mayor claridad. Høffding hacía inteligible la filosofía de Bohr.

Para comprender los textos de Heisenberg utilizamos el estudio de Cassidy *The life and science of Werner Heisenberg*, tanto en el aspecto científico como filosófico. Entre sus obras filosóficas destacamos *La parte y el todo: conversando en torno a la física atómica*, donde describe el diálogo que mantuvo con Einstein y que marcó sus posteriores desarrollos científicos y filosóficos, y *Física y filosofía*, donde se encuentra el núcleo de ideas que Heisenberg transmitió a la interpretación de Copenhague. El artículo de Stapp(1972) resultó también muy clarificador porque, dentro de la diversidad e imprecisión de concepciones que se reúnen bajo la denominación de “interpretación de Copenhague”, ofrece una base común esencial, que es la aportación de Heisenberg y Bohr. Este artículo constituyó una referencia para nuestra investigación, porque los experimentos de Renninger están dirigidos especialmente a los seguidores de dicha interpretación. También la interpretación estadística de las relaciones de indeterminación de Heisenberg que Popper ofreció en *La lógica de la investigación científica* constituyó un hallazgo útil para imaginar el experimento del interferómetro que utiliza Renninger, puesto que nos presenta una imagen fácilmente visualizable, la de los fotones que la luz contiene, los cuales, al llegar a un espejo semitransparente, se dividen y un 50% de fotones lo atraviesan y un 50% se reflejan. Y, aunque Renninger envía los fotones uno por uno y no utiliza dicha interpretación estadística, la aportación de Popper completa nuestra comprensión del funcionamiento del dispositivo de Renninger. Por otra parte, visitamos diversas bibliotecas de la Universidad de Göttingen y la Bavarian State Library de Munich para buscar nuevos textos escritos por Heisenberg y sobre su pensamiento, pero sólo la visita a Göttingen nos resultó fructuosa.

Nos hemos acercado al pensamiento filosófico de Einstein a través de los ensayos contenidos en *Albert Einstein: philosopher-scientist*, editado por Schilpp, especialmente los de Einstein, *Autobiographical Notes*, y *Reply to Criticisms*, y obras como *On the Method of Theoretical*

Physics, donde Einstein expone sus ideas epistemológicas. Para estudiar el artículo EPR hemos utilizado *The Shaky Game* de Fine, porque realiza un penetrante análisis de los argumentos contenidos en dicho artículo. Por otra parte, para abordar el debate Einstein-Bohr hemos utilizado también los ensayos de *Albert Einstein: philosopher-scientist*, especialmente el de Bohr, *Discussion with Einstein on Epistemological problems in atomic physics* y también *Ensayos sobre el pensamiento científico en la época de Einstein* de Holton. Aquí nos hemos encontrado con el hecho de que Holton interpreta el realismo de Einstein de manera diferente a como lo hace Fine. Según Holton el realismo de Einstein es metafísico porque considera que éste cree en una realidad externa e independiente y, en cambio, según Fine el realismo de Einstein es sólo epistemológico, de teoría, puesto que no se compromete a aceptar la existencia de esta realidad independiente, porque cree que no se puede demostrar, y sólo pretende que las teorías científicas sean realistas, es decir, estén construidas sobre el supuesto de que representan la realidad.

Para entender el pensamiento de Schrödinger nos hemos fijado en sus ensayos; entre ellos, *¿Qué es una ley de la Naturaleza?*, sobre el problema de la causalidad, y *La nueva mecánica ondulatoria*, que muestra con claridad el modelo ondulatorio de su autor. Y queremos destacar también una colección de ensayos que presenta gran interés, *Science and the Human Temperament*⁸⁷, que transmite una visión general de la filosofía de la ciencia del autor en la que se muestran las dudas y los conflictos intelectuales que generaba la mecánica cuántica, sobre los que Schrödinger, con su particular punto de vista, arroja luz. Nos han ayudado a entender los aspectos más sorprendentes del pensamiento de Schrödinger, como los problemas que presenta su modelo ondulatorio, el estudio de Moore *Schrödinger, life and thought* y el estudio de Scott *Erwin Schrödinger. An Introduction to His Writings*. Por otra parte, visitamos la Österreichische Nationalbibliothek de Viena para buscar nuevos textos escritos por Schrödinger y sobre su pensamiento, pero no pudimos conseguir más de lo que ya habíamos podido encontrar en nuestro país.

Además, *El debate de la teoría cuántica* de Selleri nos dió una referencia clara para entender el debate entre los seguidores de la interpretación de Copenhague y sus oponentes. Así, los físicos se planteaban las siguientes cuestiones: ¿es posible comprender la estructura y la evolución de los objetos atómicos? ¿es posible describir los procesos atómicos de manera que cualquier efecto observado tuviese una causa? Ante estas preguntas, los simpatizantes de la interpretación dominante tendían a responder negativamente; podemos considerar que su punto de vista correspondía a una

87 Que aparece también con el título *Science, Theory and Man*

actitud pesimista y los que se oponían a dicha interpretación tendían a responder positivamente; podemos decir que su punto de vista correspondía a una actitud más esperanzada y optimista.

Estas consideraciones sobre la actitud de los físicos atómicos enlazan con la perspectiva social del capítulo quinto de nuestro trabajo. El trabajo de Forman, *Cultura en Weimar, causalidad y teoría cuántica, 1918-1927*, nos hizo tomar conciencia de que los físicos que forjaron la interpretación de la mecánica cuántica vivían en un ambiente intelectual que pudo condicionar sus actitudes intelectuales, puesto que era un ambiente pesimista que propiciaba el rechazo de presupuestos de la mecánica clásica como la relación de causalidad.

El núcleo de la segunda parte del trabajo está constituido por los dos artículos de Renninger. En primer lugar, analizamos su contenido y, para comprender las motivaciones intelectuales de su autor, nos dirigimos a los trabajos y a los autores que Renninger menciona, tanto para mostrar su acuerdo como su oposición. A través de Albert Einstein Archives de la Hebrew University of Jerusalem accedemos a la correspondencia entre Renninger y Einstein; la interpretación de estas cartas presenta dificultades, pero vemos claramente que Renninger se dirigió a Einstein buscando un respaldo para sus tesis –después de que Heisenberg mostrara su desacuerdo– y de estas cartas desprendemos que Einstein aprobaba el experimento de Renninger (1953), puesto que mostraba que la onda es tan real como la partícula y no es sólo un recurso formal para calcular probabilidades, pero también encontramos que Einstein veía en el modelo de Renninger una dificultad, el problema de cómo entender la onda sin energía que éste postulaba.

Por otra parte, visitamos la Biblioteca de la Universidad de Marburg, donde Renninger fue profesor de Cristalografía desde 1948 hasta su jubilación en 1972, para ver si Renninger había publicado más trabajos relacionados con la interpretación de la mecánica cuántica y no encontramos ningún otro. También visitamos el Deutsches Museum en Munich, donde contemplamos experimentos de interferometría óptica; dichos experimentos nos sorprendieron por su nitidez, hecho que nos permite comprender la seguridad de Renninger ante los resultados de sus experimentos. Así pues, comprendemos a éste cuando escribía a Einstein en su carta del 30 de mayo de 1953: “los hechos son lo primero; en segunda línea se encuentran las dificultades y éstas no pueden poner en tela de juicio los hechos”. Y lo que Renninger presentaba, con evidencia experimental, eran hechos.

Renninger en su artículo de 1953 manifestaba el objetivo de mostrar empíricamente el modelo de la onda guía de de Broglie. Y al consultar la obra de éste encontramos que en su *Étude critique des bases de l'interprétation actuelle de la mécanique ondulatoire*, al exponer sus objeciones a la interpretación de Copenhague, presenta el experimento de Renninger, pero no el de 1953, que hemos visto que prueba su modelo de onda guía, sino el de 1960. En cambio, el de 1953 es calificado por de Broglie de *très remarquable* en nota a pie de página cuando manifiesta que Renninger está realizando en Alemania una campaña contra la interpretación mayoritaria.

Renninger en sus artículos, además de oponerse a las tesis de Bohr y de Heisenberg, como ya hemos visto, se opone a la tesis de Brillouin(1959), quien, partiendo de su teoría de la información, llega a la conclusión de que la inevitabilidad de la perturbación que sufre el objeto observado implica renunciar a la causalidad, que recordemos que era la misma conclusión a la que llegaban Bohr y Heisenberg. Los experimentos IFMs de Renninger muestran que hay observaciones en las que el objeto no es perturbado. Por tanto, estos experimentos implican que no es necesario renunciar a la causalidad.

La otra línea de investigación que hemos seguido ha sido la trazada por Jammer en su obra *The Philosophy of Quantum Mechanics*, en la que hace una digresión de tres páginas en su exposición de la teoría de la medida para explicar los dos experimentos de Renninger por la “general importancia de esta categoría de medidas” para dicha teoría. Para acercarnos a la teoría cuántica de la medida hemos utilizado la monografía de London y Bauer *The Theory of Observation in Quantum Mechanics*, que constituye una presentación concisa y simple de los problemas que plantea el acto de la observación. Dicha presentación, basada en la de von Neumann, tenía un carácter subjetivista, puesto que insistía en la tesis de que lo que produce la reducción de la función de onda es la conciencia. Una de las críticas que recibió fue la de Daneri, Loinger y Prosperi(1962), que pretendieron ofrecer una teoría objetiva de la medida. Para entender la propuesta de estos autores nos ha sido muy útil la exposición que de ella presenta Rosenfeld(1965). Pero el modelo de Daner, Loinger y Prosper, según el cual la parte microscópica del proceso de medida es el detonador de una amplificación en el aparato macroscópico de medida, no se podía aplicar, según Jauch, Wigner y Yanase(1967) a la medida que Renninger había presentado en 1960 porque en ella no hay interacción. Así encontramos otra huella de la repercusión del experimento de Renninger (1960).

Por otra parte, encontramos también un experimento mental que muestra similitudes con los

experimentos de Renninger y ayuda a entenderlos; es el que Epstein presenta en su trabajo *The reality problem in quantum mechanics*(1945). Lo estudiamos y vemos que utiliza un dispositivo similar al de Renninger(1953) y presenta resultado negativo como el de Renninger(1960). Epstein lo diseñó como un experimento con el que responder a la siguiente cuestión filosófica: ¿se pueden construir enunciados significativos sobre inobservables?, pregunta que muestra la estrecha relación que hay entre filosofía, física y tecnología, relación que hemos visto a lo largo de toda nuestra investigación sobre las IFMs.

Dos fuentes de artículos históricos han sido muy útiles para nuestra investigación. Por una parte, *Sources of Quantum Mechanics* de van der Waerden, recopilación (con una clarificadora introducción) de artículos científicos que fueron muy significativos en el nacimiento de la mecánica cuántica y, por otra parte, *Quantum Theory and Measurement*, editado por Wheeler y Zurek, que contiene los artículos más trascendentales sobre los principios fundamentales y la interpretación de la mecánica cuántica.

Finalmente, hemos estudiado los desarrollos posteriores de IFM; en primer lugar, en los trabajos de Elitzur y Vaidman, del primero de los cuales ya hemos hablado previamente, en segundo lugar, en la obra de Penrose, *Shadows of the mind*, donde se presenta una nueva versión, más sofisticada, del experimento de la bomba, y, en tercer lugar, en los artículos de Herzog, Kwiat, Weinfurter y Zeilinger, que muestran la multitud de posibilidades tecnológicas que presentan en la actualidad las IFMs.

Así pues, de esta manera hemos abordado nuestra investigación, cuyos objetivos, recordemos, eran desvelar el origen histórico de las IFMs, el marco conceptual en el que surgieron y las consecuencias filosóficas que implican. Con los resultados de la investigación que vamos a presentar, pretendemos defender la tesis de que las IFMs tienen su origen en dos experimentos de Renninger, que surgieron en el marco del debate de la primera mitad del siglo XX sobre la interpretación de la mecánica cuántica, y que sus implicaciones filosóficas llevan a la revisión de enunciados fundamentales que Bohr y Heisenberg transmitieron a la interpretación dominante.

PRIMERA PARTE

Contexto en el que surgen los experimentos de medidas sin interacción de Renninger

CAPÍTULO 1. La concepción filosófica de Bohr

ÍNDICE DEL CAPÍTULO

1	Introducción del capítulo.....	62
2	La lección epistemológica que ofrece la teoría cuántica.....	62
3	El lenguaje.....	63
4	Aportación científica.....	67
4.1	Primeros trabajos científicos.....	68
4.2	La estructura del átomo.....	69
5	El principio de correspondencia.....	74
6	La complementariedad.....	80
6.1	El camino de Bohr hacia la complementariedad.....	80
6.1.1	Bohr ante la hipótesis de los <i>quanta</i> de luz.....	80
6.1.2	La hipótesis de Bohr, Kramers y Slater.....	82
6.1.3	El carácter formal de la teoría cuántica.....	84
6.1.4	El principio de incertidumbre.....	87
6.2	Aparición de la noción de complementariedad.....	90
6.3	La conferencia de Como.....	92
6.4	La noción de complementariedad más allá de la física.....	95
6.4.1	Extensión de la noción de complementariedad.....	95
6.4.2	Psicología.....	96
6.4.3	Biología.....	100
6.4.4	Antropología.....	101
6.5	Pensamiento dialéctico.....	101
6.6	Visión crítica.....	103
7	Precedentes.....	105
7.1	Møller.....	105

		61
7.2	James.....	107
7.3	Høffding.....	110
8	El debate Bohr-Einstein.....	116
8.1	Oposición entre Bohr y Einstein.....	116
8.2	Conflicto de <i>themata</i>	125
9	Elementos kantianos en el pensamiento de Bohr.....	127
10	La concepción ontológica de Bohr.....	130
10.1	Elementos realistas.....	131
10.2	Elementos antirealistas.....	133
11	Conclusión del capítulo.....	136

1. INTRODUCCIÓN DEL CAPÍTULO

La concepción filosófica de Bohr (1895-1962) constituye la base de la interpretación de Copenhague, la interpretación más aceptada de la mecánica cuántica, y surgió de la inconsistencia que se presentaba, en el primer cuarto del siglo XX, entre los principios de la teoría cuántica y los de la física clásica. Este problema generaba confusión e inquietud entre los científicos, los filósofos y las personas que se interesaban en las cuestiones de la naturaleza y el alcance del conocimiento humano, puesto que los principios fundamentales de la física –al ocuparse dicha ciencia de las propiedades de todos los cuerpos– son básicos en la creación de nuestra visión unitaria del mundo en su conjunto. Para entender los problemas fundamentales que la teoría cuántica planteó en sus inicios, es esencial conocer las reflexiones epistemológicas que los descubrimientos de la época provocaron en Bohr, quien dedicó gran parte de su vida a responder las cuestiones que la nueva teoría suscitó respecto al carácter y los límites del conocimiento.

2. LA LECCION EPISTEMOLÓGICA QUE OFRECE LA FISICA CUÁNTICA

El pensamiento de Bohr es el fruto de los esfuerzos que éste realizó para comprender e integrar las paradójicas conclusiones que se derivaban de los descubrimientos que se produjeron en su tiempo, es decir, en la época en la que nació y se desarrolló la teoría cuántica. Bohr reiteró en sus escritos la imagen de la lección epistemológica que las paradojas de la física cuántica ofrecían. Así, Bohr estuvo profundamente preocupado por la naturaleza ondulatoria y corpuscular de la luz –dilema omnipresente en sus trabajos–; fue impresionado por la coexistencia de la continuidad en el mundo macroscópico y la discontinuidad en el mundo cuántico, así como por la coexistencia de la causalidad en el mundo macroscópico y el indeterminismo en el mundo cuántico –que constituyen el mismo mundo pero contemplado bajo dos perspectivas diferentes–; y también fue impresionado por la inevitable influencia del observador en los objetos de nuestras observaciones; así, respecto a este último problema, manifestaba:

...ha sido el descubrimiento del cuanto de acción el que nos ha enseñado que la física clásica tiene un rango de validez limitado, enfrentándonos, a la vez, a una situación sin precedentes en la física al plantear bajo una nueva forma el viejo problema filosófico de la existencia objetiva de los fenómenos con independencia de nuestras observaciones.⁸⁸

88 N.Bohr, *La teoría atómica y los principios fundamentales de la descripción de la Naturaleza*, en *La teoría atómica*

Y, al iniciar uno de sus artículos, escrito, según Bohr, en el curso de “la discusión relativa a los aspectos epistemológicos de la física cuántica”⁸⁹, escribía que: “el descubrimiento de Planck... ha provocado una completa revisión de los fundamentos que subyacen a nuestra descripción de los fenómenos naturales”⁹⁰ y concluía diciendo:

... es difícil escapar a la convicción de que los hechos revelados por la teoría cuántica que caen fuera del dominio de nuestras formas ordinarias de intuición proporcionan un medio para elucidar problemas filosóficos de alcance general [...]

Mi deseo ha sido, además, insistir, tanto como sea posible, en lo profundamente que han sido sacudidos por los nuevos conocimientos los fundamentos del edificio conceptual sobre los que descansa la representación clásica de la física e incluso todo nuestro modo habitual de pensar.⁹¹

Como vemos, Bohr buscaba encontrar la forma como afectaba la nueva teoría cuántica a los principios filosóficos universales. Con los nuevos descubrimientos de la física, la concepción filosófica general no podía ser la misma que antes, porque dichos progresos atacaban los fundamentos más profundos del sistema conceptual que constituía el marco del pensamiento humano de la época. Como la revolución copernicana, que nos apartó del centro del universo, y la teoría de la relatividad, que nos mostró que los fenómenos físicos dependen del punto de vista del sistema de referencia del observador, la teoría cuántica también nos dió una lección epistemológica, que cambió nuestra actitud ante la descripción de la naturaleza, puesto que puso en duda supuestos implícitos muy arraigados, como el principio de causalidad.

En palabras de Bohr:

Las ciencias físicas son, de hecho, una parte integrante de nuestra civilización, no sólo porque nuestro dominio, continuamente creciente, de las fuerzas de la naturaleza, ha cambiado completamente las condiciones materiales de la vida, sino también porque el estudio de estas ciencias ha contribuido en amplia medida a clarificar los fundamentos de nuestra propia existencia.¿Qué significa que hayamos

y la descripción de la Naturaleza, Alianza Editorial, Madrid (1988)(p.153)

89 N.Bohr, prefacio escrito en 1961, a la reedición de los ensayos contenidos en *La teoría atómica y la descripción de la Naturaleza*, Alianza Editorial, Madrid, (1988) (p.50)

90 N.Bohr, *El cuanto de acción y la descripción de la Naturaleza* (1929), publicado en *La teoría atómica y la descripción de la Naturaleza*, Alianza Editorial (1988) (p.133)

91 N. Bohr, *El cuanto de acción y la descripción de la Naturaleza*, *Ibid.*, (p.141)

dejado de considerarnos seres privilegiados que vivían en el centro del universo [...] y que [...] hayamos comprendido que habitamos un pequeño planeta esférico del sistema solar, sistema que no es más que una pequeña parte de sistemas aún mucho más grandes? [...]

Mientras la importancia de estas grandes realizaciones para nuestra visión general del mundo es generalmente comprendida, no sucede aún lo mismo en lo que se refiere a la insospechada lección epistemológica que hemos recibido en los últimos años al abrirse campos completamente nuevos de investigación científica.⁹²

Aunque la teoría cuántica forme parte de una ciencia concreta, la física, el carácter universal de sus conclusiones contribuye a que los seres humanos posean un marco conceptual unitario y disfruten de una comprensión armónica de la existencia. Por eso Bohr dijo, refiriéndose a los últimos descubrimientos cuánticos: “Aunque estos desarrollos se hayan iniciado a través de estudios especializados, son una lección general de gran importancia para el problema de la unidad del conocimiento”⁹³.

Los intentos de Bohr por comprender la naturaleza del conocimiento humano fueron constantes, pero no sistemáticos; es decir, ocuparon su mente durante largas etapas de su vida, pero no los llegó a estructurar, porque a menudo estaba dudando, cambiando de parecer, volviendo una y otra vez sobre los mismos problemas, de la misma manera que trabajaba corrigiendo y ampliando una y otra vez sus escritos, pues sus pensamientos evolucionaban dependiendo de los últimos hallazgos de los físicos y de sus diálogos con otros científicos y filósofos, el más famoso de los cuales fue, sin duda, el que mantuvo con Einstein, debate que permanece en la historia como uno de los más fructíferos de la ciencia contemporánea.

3. EL LENGUAJE

En la mayoría de los ensayos filosóficos de Bohr las ideas principales quedan más sugeridas que claramente explicadas, porque su estilo de exposición es siempre denso y, con frecuencia, oscuro. Los términos no suelen estar utilizados con precisión y resultan, a menudo, ambiguos, puesto que

92 N.Bohr, *Les ciències físiques i las cultures humanes* (1938), en *Física atòmica i coneixement humà*, Edicions 62, Barcelona (1967), (p.49-50)

93 N.Bohr, *La unitat del coneixement* (1954), en “*Física atòmica i coneixement humà*” Edicions 62, Barcelona (1967), (p.109)

con la misma palabra expresa diferentes significados, a pesar de que Bohr aluda, frecuentemente, a un ideal de comunicación inambigua. Bohr no suele ser directo ni conciso sino que gusta de expresarse con circunloquios; es decir, en lugar de dar un solo sustantivo que evidencie la esencia de un concepto, muestra las cualidades y relaciones que dicho concepto mantiene con otros conceptos. Ya que los circunloquios precisan de complicadas oraciones compuestas, la sintaxis con la que Bohr se expresa es sumamente complicada. Así, Bohr se extiende y extiende desarrollando las mismas ideas en muchas direcciones, a través de largas oraciones. Las frases que le caracterizan son complejas –a veces un párrafo entero está constituido por una sola oración–; son oraciones compuestas de varias oraciones subordinadas que, a su vez, contienen otras oraciones subordinadas en su interior. Así H.Kragh, que estudió en el Instituto Niels Bohr, escribió⁹⁴ al respecto: “Característico de la aproximación filosófica de Bohr a la física son los largos argumentos incluidos en enrevesadas frases llenas a menudo de consideraciones vagas y generales”. Respecto al hecho de que Bohr casi no utilizara relaciones matemáticas exactas en sus artículos, Dirac dijo⁹⁵: “Aunque me impresionaba mucho lo que Bohr decía, sus argumentos eran casi siempre de naturaleza cualitativa [...] y yo quería frases que pudiesen expresarse en ecuaciones”. Y, en cuanto a su redacción, Rutherford escribió⁹⁶ a Bohr en una carta: “Creo que tiene usted tendencia a alargar demasiado sus escritos y a repetir sus afirmaciones en diferentes partes del mismo”. Así pues, a pesar de que Bohr trató a menudo de la comunicación, él no fue, en general, un buen comunicador. No obstante, con el paso del tiempo fue mejorando poco a poco la manera de expresar sus pensamientos y el estilo de sus últimos ensayos ganó, en cierta medida, claridad y fluidez⁹⁷.

Además, él fue plenamente consciente de sus dificultades para comunicarse; y en ocasiones mostró sus dudas y su preocupación, pues temía no ser comprendido; pero, en cambio, en otras ocasiones, presentó la oscuridad como un atributo de la profundidad de pensamiento. Así, una de las historias favoritas que Bohr explicaba era la siguiente:

En un alejado pueblo vivía una pequeña comunidad judía. Un día un famoso rabino visitó la ciudad más cercana y, como la gente del pueblo deseaba conocer el mensaje del maestro, envió a un joven

94 Citado por M.Ferrero en el prólogo a *La teoría atómica y la descripción de la Naturaleza*, Alianza Editorial (1988), (p.27)

95 Citado por M. Ferrero en *Ibid.* (p.27)

96 Citado por M. Ferrero en *Ibid.*(p.28)

97 Como Bohr dijo en 1957, en el prólogo a su colección de artículos *Física atómica y conocimiento humano*: “han resultado inevitables muchas repeticiones, pero se espera que ello pueda servir para demostrar cómo los razonamientos han ganado poco a poco en claridad”. N.Bohr, *Física atómica y conocimiento humano*, Aguilar, Madrid, (1964)

a escucharle. Cuando éste regresó al pueblo dijo: "El rabino habló tres veces. El primer discurso fue brillante; claro y simple. Entendí cada palabra. El segundo fue incluso mejor; profundo y sutil. No entendí mucho, pero el rabino lo entendía todo. El tercero fue mucho mejor; una gran e inolvidable experiencia. No entendí nada y el rabino no entendió mucho tampoco"⁹⁸

Bohr reiteraba los mismos temas a lo largo de sus ensayos, mostrando poca variación en sus ideas principales. Cuando alguien le decía que todos sus artículos eran similares, él respondía con esta otra historia⁹⁹ de un filósofo sofista. Éste había permanecido fuera de Atenas durante mucho tiempo y, cuando regresó, se mostró sorprendido por encontrar a Sócrates dialogando en su lugar habitual. "¿Estás tu," preguntó, "todavía aquí diciendo las mismas cosas sobre las mismas temas?" Y Sócrates respondió: "¿No dices tu siempre las mismas cosas sobre las mismas temas?". Como el sofista, como Sócrates, Bohr también reiteraba una y otra vez sus ideas sobre los mismos temas, los que le interesaron durante toda su vida.

Así, según Petersen¹⁰⁰, las ideas que Bohr exponía en sus ensayos se podían reducir básicamente a ideas que ya había concebido en su juventud. Antes de terminar sus estudios en la universidad había manifestado su deseo de escribir un libro de filosofía, pero no lo hizo, sino que durante 20 años se dedicó enteramente al trabajo científico. Empezó a hacer experimentos sobre tensión superficial y comentando el cambio que realizó de filósofo a físico empírico dijo: "Yo no sueño despierto, estoy deseando realizar un duro trabajo". Y continuó investigando en el campo de la física; en primer lugar, escribió su tesis doctoral; posteriormente trabajó en la investigación de la estructura del átomo y desde 1913 a 1927 dirigió el desarrollo de la física atómica. Este desarrollo le llevó de nuevo a la filosofía, pues la teoría cuántica le inspiró una lección epistemológica que le acercó a sus pensamientos de juventud y dicha lección fue explicada públicamente por Bohr a lo largo de los 35 años restantes de su vida. Su posición como uno de los físicos más prestigiosos del mundo otorgó autoridad a su discurso de pensador. Y, de esta manera, su concepción filosófica se convirtió en la base de la interpretación de la teoría cuántica más aceptada, la llamada interpretación de Copenhague.

Pero Bohr nunca se refirió a su pensamiento como una filosofía propia, ni presentó una exposición detallada y sistemática de él, ni tampoco lo relacionó con otros sistemas filosóficos. Sus ensayos,

98 A. Petersen, The philosophy of Niels Bohr, *Bulletin of the Atomic Scientists* 19 (7), 8. Sept. 1963 (p.8)

99 A. Petersen en *Ibid.* (p.10)

100A. Petersen en *Ibid.* (p.9)

escritos muchas veces a partir de conferencias y de otros trabajos previos, son reiterados intentos de mostrar al mundo sus reflexiones. Sin embargo, Bohr no dejó de repetir la dificultades con las que se enfrentaba para transmitir sus reflexiones. Mas, la oscuridad, la riqueza y la sutilidad del estilo expositivo de Bohr se puede relacionar a menudo con el contenido de sus meditaciones; por ejemplo, el discurso dialéctico, que en ocasiones presenta, enlaza con su idea de la complementariedad de aspectos aparentemente contradictorios y la vaguedad de su expresión enlaza con la consideración de la esencial ambigüedad del lenguaje humano en general. Así pues, según Bohr, deseamos comunicarnos de forma clara e inambigua, sin malentendidos; pero nuestra paradoja consiste en el hecho de que el lenguaje, que es nuestro principal medio de expresión, es en sí mismo ambiguo. “Dependemos de nuestras palabras. Estamos suspendidos en el lenguaje. Nuestra tarea es comunicar experiencia e ideas a otros. Hemos de esforzarnos continuamente por extender el alcance de nuestra descripción”¹⁰¹. Pero para describir nuestras experiencias y comunicar nuestras ideas hemos de usar un sistema de conceptos, un marco conceptual, que puede resultarnos ineficaz por ser demasiado estrecho; la razón es que dichos conceptos hayan sido creados para expresar un conjunto de experiencias más pobre del que hemos adquirido gracias a los nuevos descubrimientos científicos.

Finalmente, cabe decir que, aunque Bohr trató a menudo del lenguaje, no se pronunció nunca respecto a la vieja cuestión de la relación entre lenguaje y realidad y, ante la concepción tradicional de que la realidad subyace al lenguaje y éste es una representación de aquella, Bohr dijo que¹⁰² “Estamos suspendidos en el lenguaje de manera que no podemos decir qué está arriba y qué está abajo. La palabra 'realidad' es también una palabra, una palabra que hemos de aprender a usar correctamente”. Y, así, Bohr no se preocupó por cuestiones ontológicas, que consideraba infecundas.

4. APORTACIÓN CIENTÍFICA DE N. BOHR

La aportación epistemológica de N. Bohr surgió de su profunda reflexión sobre los hallazgos y desarrollos de la física cuántica de su época, algunos de los cuales él mismo protagonizó. Revisemos brevemente estos últimos.

101 Petersen, *Ibid.*, (p.10)

102 Petersen, *Ibid.*, (p.11)

4.1 PRIMEROS TRABAJOS CIENTÍFICOS

Su tesis doctoral (1911) fue un trabajo teórico sobre la teoría electrónica de los metales. Esta teoría representa el estado metálico como un gas de electrones moviéndose en el potencial creado por los átomos positivamente cargados. Cuando no actúan fuerzas electromagnéticas externas, los electrones se mueven al azar en todas direcciones y no aparece corriente eléctrica alguna pero, cuando dichas fuerzas actúan, los movimientos de los electrones presentan una dirección determinada y entonces aparece corriente. Con este modelo, el joven Bohr explicaba cualitativamente la mayoría de las propiedades de la conductividad eléctrica y térmica de los metales, pero tenía dificultades para presentar una explicación cuantitativa a partir de los principios de la electrodinámica clásica. Así, por ejemplo, ni podía explicar el efecto Thomson¹⁰³ ni el efecto Peltier¹⁰⁴; además Bohr también descubrió nuevas paradojas¹⁰⁵ relacionadas con el efecto Hall¹⁰⁶, puesto que la teoría clásica ofrecía una explicación cuantitativa aceptable de la fuerza del campo eléctrico inducido por este efecto en algunos metales, pero no en todos. Así Bohr se dió cuenta de que, para describir los fenómenos atómicos, era necesario apartarse de la teoría electromagnética clásica y, por esta razón, señaló¹⁰⁷ en su tesis doctoral: “ En el presente estado del desarrollo de la teoría del electrón, no parece posible explicar las propiedades magnéticas de los cuerpos desde esta teoría”. Y posteriormente W. Pauli escribió¹⁰⁸ al respecto: “Se puede decir que la confianza en la teoría del electrón de los metales fue [...] completamente perdida [...] hasta que la teoría cuántica creó una situación nueva”. Y Bohr comenzó a alejarse de las teorías clásicas.

Meses después de haber presentado su tesis, Bohr conoció a Rutherford en Manchester, poco tiempo después de que éste hubiera presentado su modelo atómico, según el cual el átomo de un determinado elemento está compuesto por un número Z de electrones, cada uno de los cuales tiene una carga de $-e$, y por un cuerpo central (que más tarde se llamará “núcleo”) con una carga de Ze , en el que se encuentra prácticamente toda la masa del átomo. En el artículo de 1911 en el que Rutherford mostró definitivamente su modelo atómico ofreció también una estimación aproximada

103 Fenómeno consistente en la aparición de un gradiente de potencial a lo largo de un conductor cuando éste se encuentra sometido a un gradiente de temperatura

104 Fenómeno consistente en la producción o absorción de calor como consecuencia del paso de corriente eléctrica a través del contacto de dos conductores diferentes

105 Según A. Pais en *Niels Bohr's Times, in Physics, Philosophy and Polity*, Clarendon Press, Oxford (1991), (p.110)

106 Fenómeno consistente en que, cuando pasa una corriente eléctrica a través de una barra metálica situada en un campo magnético, aparece un campo eléctrico, que es perpendicular a la corriente y a dicho campo magnético.

107 Pais, *Ibid.*, (p.110)

108 Pais, *Ibid.*, (p.110)

del radio del núcleo: éste era 100.000 veces más pequeño que el del átomo¹⁰⁹.

Pero no fue Rutherford, sino más bien C.G.Darwin, quien inspiró a Bohr, puesto que éste adoptó la noción de núcleo de Rutherford para solucionar el problema que C.G.Darwin intentaba solventar. Charles Galton Darwin estaba investigando un tema que le había propuesto Rutherford: la pérdida de energía de las partículas α cuando atraviesan un cuerpo. Su punto de partida era el modelo atómico de Rutherford y suponía que los electrones estaban libres cuando chocaban con una partícula α . Así, Darwin había conseguido explicar adecuadamente que la pérdida de energía era casi exclusivamente debida a las colisiones que se daban entre las partículas α y los electrones del interior del átomo, pero no podía explicar por qué los electrones se movían en el interior del átomo. Y, según sus resultados, el valor del radio atómico r se encontraba muy alejado del que se obtenía a través de la teoría de gas de Boltzmann; en particular, en el caso del hidrógeno, no estaba claro que éste tuviera un único electrón.

Bohr pensaba que los problemas con los que se encontraba Darwin eran debidos a su supuesto de que los electrones se encontraban libres cuando chocaban con las partículas α . La propuesta de Bohr era considerar los electrones que rodean el núcleo como “vibradores atómicos”; o sea, Bohr sugería que estaban elásticamente ligados al núcleo. Aunque, como él mismo vió posteriormente, realmente no era así, sus resultados eran muy superiores a los de Darwin. Y, por esta razón, Bohr impuso condiciones cuánticas a los electrones:” Según la teoría de la radiación de Planck[...] la menor cantidad de energía que puede radiarse de un vibrador atómico es igual a ν [veces] k ”¹¹⁰, siendo ν el número de vibraciones por segundo y k (que posteriormente se representó como h) la constante de Planck. Así pues, ésta es, según Pais, la primera vez que aparece la teoría cuántica en un trabajo de Bohr sobre la disposición interna del átomo. Y fue precisamente con este trabajo¹¹¹ sobre las partículas α , publicado en 1913, que él se introdujo en la investigación de la estructura atómica, tema en el que aportó su mayor contribución al conocimiento científico.

4.2 LA ESTRUCTURA DEL ÁTOMO

En Manchester Bohr trabajó con Rutherford y puso las bases de su mayor logro, el modelo atómico

109 Pais, *Ibid.*, (p.124)

110 Pais, *Ibid.*, (p.127)

111 N.Bohr, *Phil. Mag.* **25**, 10, 1913, repr. *Collected Works*, Vol. 2 (p.18)

que presentó en sus artículos de 1913¹¹². Cuando, en 1912, Bohr se había introducido en el tema de la constitución atómica, el núcleo y los electrones eran tratados de forma separada, puesto que no se había estudiado aún la relación que mantenían los diversos componentes del átomo. Así pues, se habían descubierto los electrones y el núcleo gracias a los experimentos de Thomson y de Rutherford; pero, por una parte, Rutherford, al inferir la existencia del núcleo a partir del análisis de los datos de la dispersión de las partículas α , había ignorado la función de los electrones en el proceso de dispersión y, por consiguiente, había considerado el átomo como un núcleo sin electrones y, por otra parte, Darwin había ignorado la influencia del núcleo en su estudio de la absorción de las partículas α . Mas la interpretación de los anteriores experimentos se basaba en las leyes de la electrodinámica clásica y la aplicación de dichas leyes a la interacción entre los electrones y el núcleo presentaba serios problemas.

La principal dificultad que aparecía era la estabilidad del átomo, puesto que en las teorías clásicas ningún sistema de partículas cargadas mostraría una estabilidad como la que se había de atribuir a las estructuras atómicas para explicar las propiedades que se observan en la materia. Así, si se considera el caso de un átomo que contenga un solo electrón se ve que un sistema electrodinámico clásico que consista en un núcleo positivo y una única carga negativa no mostraría la estabilidad que presenta un átomo real, puesto que si el electrón gira alrededor del núcleo radiaría energía continuamente en forma de ondas electromagnéticas de frecuencia variable y finalmente el electrón caería sobre el núcleo. Admitiendo que, en cada momento, la frecuencia observada en la radiación emitida es igual a la frecuencia del movimiento del electrón en su órbita alrededor del núcleo y que esta última frecuencia disminuye al perder energía el electrón, se emitiría un espectro continuo de luz y el electrón terminaría por caer sobre el núcleo. Por consiguiente, el modelo de átomo de Rutherford no explicaba ni la estabilidad del átomo ni la existencia de rayas espectrales precisas. En las propias palabras de Bohr:

Si miramos más al interior del origen de este espectro la situación empeora . La emisión de energía de radiación a partir del átomo será acompañada, según las leyes electrodinámicas clásicas, de una gradual disminución del tamaño de la órbita y del período de revolución del electrón, lo cual evitará la aparición de precisas líneas espectrales monocromáticas y finalmente provocará que el electrón se combine con el protón en un sistema neutro de dimensiones lineales excesivamente pequeño, en comparación con las de los átomos reales[...]Así pues, de la mecánica y de la electrodinámica ordinarias no se puede derivar

¹¹²El artículo sobre el hidrógeno apareció en julio; el de los átomos más pesados que el hidrógeno en setiembre y el de la estructura de las moléculas en noviembre.

ningún argumento que permita explicar por qué los constituyentes eléctricos del átomo no se neutralizan entre sí de una manera catastrófica para la estabilidad de los cuerpos materiales¹¹³.

Según Bohr, no se pudo desarrollar una teoría coherente de la estructura interna del átomo hasta que introdujo la teoría de Planck con su constante h , el “*quantum* de acción elemental”¹¹⁴, que ya Einstein había utilizado con gran éxito en 1905¹¹⁵. Bohr pudo introducirla imponiendo dos postulados¹¹⁶, que, evidentemente, no son clásicos:

- 1) Un sistema atómico sólo es estable cuando se encuentra en un determinado conjunto de estados, los llamados “estados estacionarios”, que corresponden a los valores discretos de la energía del átomo. Cada cambio en esta energía se asocia con una “transición” de un estado estacionario a otro.

Por consiguiente, según el primer postulado, el electrón no llega a caer, porque no puede

descender a un estado más bajo que el estado estacionario fundamental, que es aquel al que le corresponde $n = 1$. De esta manera, Bohr impedía que el electrón se disparase contra el núcleo estableciendo, simplemente, que el estado básico es estable, aunque los otros estados superiores sean inestables. Así pues, el primer postulado explica la estabilidad del átomo que se observa en gran número de fenómenos físicos y químicos.

- 2) La capacidad del átomo para absorber y emitir radiación se rige por la ley según la cual la radiación asociada con una transición ha de ser monocromática y de frecuencia ν tal que

113N.Bohr, Chemistry and the Quantum Theory of Atomic Constitution (1932)(p.356) *Collected Works*, North-Holland, Amsterdam (desde 1972)

114Para explicar el espectro de radiación del cuerpo negro, Planck en 1900 había postulado que la energía estaba cuantizada y la cantidad de energía que podía emitirse tenía un límite inferior. Planck vió que, introduciendo su *quantum* de acción elemental h , su ecuación coincidía con los datos experimentales, pero realmente no entendía el significado de h .

115Entonces empezó a comprenderse el significado de h . Einstein pensó que la energía de las ondas luminosas estaba concentrada en pequeños paquetes –fotones-- cuya magnitud estaba determinada por h y que la energía y la frecuencia de los fotones seguían la relación $E=h\nu$. Pero esta propuesta de Einstein mostraba una interpretación de la luz como onda y como partícula, concepción que perturbó en gran manera al mismo Einstein, a Bohr y a muchos de los físicos de la época.

116N. Bohr “Atom”, *Collected Works*, Vol. 12 , (p.643). Bohr escribe sobre los dos postulados en muchas ocasiones; en ésta los expone de forma muy clara, debido al carácter didáctico y divulgativo del trabajo, escrito para la 13ª edición de la Encyclopaedia Britannica(1926).

$$h\nu = E_1 - E_2$$

siendo h la constante de Planck y E_1 y E_2 las energías de los dos determinados estados estacionarios

El segundo postulado, que es muy cercano a la ley de Einstein del efecto fotoeléctrico, ofrece una base para entender los espectros lineales, puesto que explica la relación fundamental de los espectros descubierta por Rydberg: $\nu = T'' - T'$

donde $T = R / (n - \alpha k)^2$ y $\nu = R (1/n''^2 - 1/n'^2)$

siendo esta última la fórmula empírica de Balmer, que establece las frecuencias ν de las líneas de los espectros .

Siendo n, n', n'' números enteros, siendo αk constante y siendo R la constante de Rydberg.

Así, según el segundo postulado de Bohr, el átomo pasa de un estado estacionario de energía E_1 a otro de energía E_2 emitiendo luz de frecuencia ν . Por consiguiente, Bohr demostró que la discreción observada en los espectros es consecuencia directa de la discreción de los estados atómicos. Además, a partir de la fórmula de Balmer y de sus postulados cuánticos dedujo el valor numérico de la energía E_n , que es : $E_n = Rh/n^2$

Y Bohr también infirió el valor de R , la constante de Rydberg, que predijo como:

$$R = 2 \pi^2 m e^4 / h^3$$

(siendo m y e la masa y la carga del electrón, respectivamente, y h la constante de Planck)

Para deducir este valor de R , Bohr postuló que “en el límite en el que sucesivos estados estacionarios difieren comparativamente poco uno de otro [...] las frecuencias asociadas con la

transición de un estado al siguiente tienden a coincidir con las frecuencias de revolución [del electrón alrededor del núcleo] en estos estados¹¹⁷.

El valor de R así inferido por Bohr fue avalado por los datos experimentales y ello, junto a la verificación del valor del radio de la órbita del electrón del hidrógeno, también predicho por Bohr, significó un éxito¹¹⁸ indiscutible para su modelo atómico. Por esta razón, Bohr continuó con dicho modelo y lo amplió a átomos más complejos, con un núcleo de carga Ze .

Bohr describía, años después, el proceso que realizó para solventar con éxito las dificultades que presentaba el modelo de átomo de Rutherford, con estas palabras:

La existencia del cuántum elemental de acción expresa, en realidad, un nuevo rasgo de individualidad de los procesos físicos, que es completamente extraño a las leyes clásicas de la mecánica y del electromagnetismo y que limita su validez esencialmente a aquellos fenómenos que implican acciones grandes comparadas con el valor de un simple cuántum...y es sólo la existencia del cuántum de acción lo que impide en realidad la fusión de los electrones y del núcleo en un corpúsculo masivo neutro de extensión prácticamente infinitesimal.

El reconocimiento de esta situación sugirió en seguida la descripción del enlace de cada electrón en el campo alrededor del núcleo como una sucesión de procesos individuales en virtud de los cuales el átomo es transferido desde uno de los estados llamados estacionarios a otro de estos estados, con emisión de la energía desprendida en forma de un simple cuántum de radiación electromagnética. Esta concepción, íntimamente emparentada con la interpretación de Einstein del efecto fotoeléctrico, y confirmada convincentemente con las bellas investigaciones de Franck y Hertz, sobre la excitación de las líneas espectrales por los impactos de los electrones sobre los átomos, de hecho no sólo proporcionó una explicación inmediata de las enigmáticas leyes de los espectros de rayas mostradas por Balmer, Rydberg y Ritz, sino que también[...] nos ofreció una explicación completa de las relaciones remarcables que hay entre las propiedades físicas y químicas de los elementos, expresadas en la famosa tabla periódica de Mendelejev.¹¹⁹

117Bohr, Atom , *Collected Works* (p.644)

118Para Pais en *Ibid.*, (p.148) la fórmula de R es la ecuación más importante que Bohr dedujo en su vida porque representó el triunfo de una nueva lógica, la de la teoría cuántica, sobre la lógica de la física clásica.

119N.Bohr, *Biología i física atòmica(1937)*, en *Física atòmica i coneixement humà*, Edicions 62, Barcelona (1967), (p.40-1)

Pero a Bohr se le planteaban nuevas preguntas para la cuales no tenía respuesta: ¿Cómo “decide” un sistema en qué estado estacionario se encuentra? ¿Cómo “decide” cuándo ha de pasar de un estado a otro?¹²⁰ Son cuestiones¹²¹ referidas al principio de causalidad, que permanecieron sin respuesta hasta que, según Pais¹²², la mecánica cuántica le presentó una respuesta: no tienen significado.

Así, a pesar del éxito que la comunidad científica atribuyó a Bohr por sus logros en el descubrimiento de las leyes que gobiernan los constituyentes del átomo, él no se mostraba plenamente satisfecho. Así lo considera Pais, que presenta diversas manifestaciones de este sentimiento que albergaba Bohr¹²³, puesto que ya en diciembre de 1913 el mismo Bohr había dicho que “de ninguna manera estaba intentando ofrecer lo que normalmente se entiende como una explicación”. Posteriormente Landé, en una entrevista publicada en 1962, manifestó que Bohr “estaba muy insatisfecho con este modelo [...]. Yo pienso que él siempre tuvo la idea de que era temporal y algo provisional”. Y, finalmente, J.Franck, en otra entrevista publicada el mismo año, también manifestó que Bohr había dicho: “No puedes creer eso. Ésta es un burda explicación. Hay en ella demasiado de aproximación y no es filosóficamente correcta”.

5. EL PRINCIPIO DE CORRESPONDENCIA

El germen del principio de correspondencia se encontraba ya en los primeros trabajos de Bohr sobre la estructura atómica del hidrógeno, publicados en 1913, porque, aunque entonces Bohr aún no lo había formulado explícitamente, dicho principio había inspirado su investigación; pues se guiaba por la máxima de que la teoría cuántica, en el límite de los grandes números cuánticos, había de tender asintóticamente a la teoría clásica. Así, en sus trabajos sobre el hidrógeno, Bohr, como hemos visto, enlazaba la nueva física cuántica con la física clásica al establecer que, en los procesos de radiación, en el límite donde la diferencia de energía de sucesivos estados estacionarios tiende a 0, es decir, para elevados números cuánticos, las frecuencias asociadas con la transición de un estado al siguiente tienden a coincidir con las frecuencias de revolución del electrón. Por consiguiente, la radiación emitida en este límite puede ser cuantitativamente descrita por la física clásica.

¹²⁰Cuestiones que, según Pais en *Ibid.* (p.153) inmediatamente Rutherford le planteó en una carta de marzo de 1913 y que Bohr eludió en su carta de respuesta

¹²¹A las cuales se puede añadir una pregunta relacionada que Einstein propuso, según Pais, en 1917: ¿Cómo sabe un *quá.ntum* de luz emitido en una transición atómica en qué dirección ha de moverse?

¹²²Pais, *Ibid.* (p.153)

¹²³Pais, *Ibid.* (p.155)

Esta consideración constituye un ejemplo de aplicación del principio de correspondencia, principio heurístico y metodológico que guió a Bohr en sus esfuerzos por establecer una teoría cuántica coherente durante las décadas de 1910 y 1920. La teoría cuántica en aquella época había explicado una gran cantidad de datos espectrocópicos pero necesitaba una estructura que le diera consistencia, porque constituía una mezcla de reglas y problemas que se habían resuelto con la adaptación de las teorías clásicas a las condiciones cuánticas.

La teoría cuántica alrededor de los años 20 se enfrentaba a graves problemas, tales como la determinación de los estados de energía del átomo de helio y el anómalo efecto Zeeman¹²⁴. Así, en 1918, Bohr escribió que:

Se mostrará que parece posible ofrecer alguna luz en las excepcionales dificultades [de la teoría cuántica] intentando trazar la analogía entre la teoría cuántica y la teoría ordinaria de la radiación tan cercana como sea posible.

Como vemos, esta relación asintótica entre teoría cuántica y electrodinámica clásica originalmente Bohr la llamó “analogía”, término que empleaba a menudo¹²⁵ y que muestra la influencia de su profesor Høffding, quien mantenía que las analogías cumplen una función heurística, porque nos ayudan a entender lo desconocido en base a lo que es conocido, pues entendemos los nuevos fenómenos en la medida en la que los vemos como similares a los fenómenos que ya conocemos.

Y fue en 1920 cuando utilizó por primera vez¹²⁶ la palabra “correspondencia” como término técnico:

Además, aunque el proceso de radiación no pueda describirse en base a la teoría ordinaria de la electrodinámica, según la cual la naturaleza de la radiación emitida por un átomo está directamente relacionada con los componentes armónicos que se dan en el movimiento del sistema, se ha encontrado, no obstante, que existe una correspondencia trascendental entre los diversos tipos de posibles transiciones entre los estados estacionarios, por una parte, y los diversos componentes armónicos del movimiento, por otra. Esta correspondencia es de tal naturaleza que la teoría presente de los espectros

124 Fenómeno consistente en el desdoblamiento de cada una de las líneas de un espectro atómico en nuevas líneas dispuestas simétricamente respecto a las líneas iniciales cuando los átomos que producen el espectro están sometidos a un campo magnético.

125 Høffding fue, como veremos, el filósofo que más directamente influyó en el pensamiento de Bohr

126 En el artículo de Bohr Sobre los espectros de series de los elementos, según manifiesta Jammer en *Conceptual Development of Quantum Mechanics*, Tomash Publishers. American Institute of Physics, (1989), (p.112)

en cierto sentido ha de considerarse como una generalización racional de la teoría ordinaria de la radiación.

Bohr explicó así la razón por la que cambió su terminología:

El problema tratado en este párrafo ofrece una simple aplicación del punto de vista desarrollado en la parte I y denotado allí como una conexión formal, o analogía, entre la teoría cuántica y la teoría electromagnética clásica de la radiación. Para evitar el posible malentendido de que haya aquí una cuestión de una conexión directa entre la descripción de los fenómenos según la teoría cuántica y según la electrodinámica clásica, en posteriores artículos del autor la ley en la que aparece esta analogía se designará como el “principio de correspondencia”.

Aunque no se puede atribuir a Bohr una precisa definición del principio de correspondencia, se encuentran en sus escritos una gran cantidad y diversidad de alusiones a dicho principio; y a partir de ellas se puede decir que, en esencia, este principio mantiene que, para números cuánticos elevados, los resultados inferidos por la teoría cuántica han de coincidir con los derivados de las teorías clásicas. La razón es que, en la región de los altos números cuánticos, la diferencia entre las energías de estados estacionarios sucesivos converge a 0 y por ello en la relación que expresa el postulado de Bohr, $E_n - E_m = h\nu$, al tender a 0 el primer término de la ecuación también lo hace el segundo.

En este sentido, el principio es una generalización del hecho, que hemos visto, de que los resultados derivados de la teoría del hidrógeno de Bohr, en la región límite de grandes números cuánticos, tienden asintóticamente a los deducidos de la electrodinámica clásica. Como el mismo Bohr escribió: “La pretensión de concebir la teoría cuántica como una generalización racional de las teorías clásicas condujo al establecimiento del principio de correspondencia”¹²⁷, que “expresa el intento de utilizar hasta el último extremo los conceptos de las teorías clásicas de la mecánica y de la electrodinámica, a pesar de la contradicción que se da entre estas teorías y el *quánum* de acción”¹²⁸.

127N.Bohr, *El postulado cuántico y el desarrollo reciente de la teoría atómica*, (1927), publicado en *La teoría atómica y la descripción de la Naturaleza*, Alianza Editorial, Madrid (1988), (p. 88)

128N.Bohr, *La llum i la vida* (1932), publicada en *Física atòmica i coneixement humà*, Edicions 62, Barcelona (1967), (p.24)

El principio de correspondencia fue una creación versátil y productiva¹²⁹ que ayudó a Bohr como guía metodológica en su trabajo; así, pues, él mismo escribió¹³⁰ en 1923:

Con la ayuda del principio de correspondencia hemos podido explicar completamente las reglas características que rigen la aparición, aparentemente caprichosa, de las líneas de combinación,...

Y años después, Bohr siguió valorando la función que el principio de correspondencia había desempeñado en su investigación; así, en 1932, escribió:

Aplicando el principio de correspondencia se ha realizado un desarrollo tan remarcable de la mecánica atómica que nos ha proporcionado métodos adecuados para el cálculo de las energías de los estados estacionarios de los átomos y de las probabilidades de los procesos de transición, de manera que nuestra descripción de las propiedades atómicas es tan completa como la explicación de los fenómenos astronómicos por la mecánica newtoniana¹³¹

Según Murdoch¹³², la justificación del principio de correspondencia se basa en el hecho de que Bohr ve la relación que se da entre la teoría cuántica y la teoría clásica como una relación de reducción. Así, una teoría T_2 puede decirse que corresponde a otra teoría T_1 en el sentido de Bohr si y sólo si algunas o todas las leyes (las leyes del tipo de las generalizaciones) de T_2 se reducen (es decir, son iguales o pueden transformarse en) a las de T_1 cuando ciertos parámetros de T_2 constituyen valores extremos.

Esto no significa que las leyes de T_2 sean idénticas o puedan transformarse en las de T_1 si no se cumple la condición de que dichos parámetros de T_2 sean valores límites, puesto que bajo esta relación de reducción las constantes de T_2 no desaparecen ni sus leyes alteran la forma, ya que, en esencia, las leyes de T_1 y de T_2 son distintas.

Así pues, la formulación matemática de las leyes de la física cuántica y la de las de la física clásica son distintas, pero las soluciones numéricas ofrecidas por ambas teorías son prácticamente idénticas cuando la constante de Planck h es negligible. Y, en este punto de la argumentación, Bohr repetía

129M.Jammer, *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, American Institute of Physics, (1989), (p.116)

130N.Bohr, *The Structure of the Atom*, *Nature*, (1923),(p. 1-16)

131Bohr, *La llum i la vida*, *Ibid.* (p.25)

132D.Murdoch, *Niels Bohr's philosophy of physics*, Cambridge University Press, Cambridge, (1987), (p.39)

una comparación que le acercaba a Einstein: de la misma manera que la teoría especial de la relatividad se reduce a la mecánica clásica cuando a la constante c , es decir, a la velocidad de la luz, se le atribuye el valor ∞ , así también la teoría cuántica se reduce a la teoría clásica cuando a la constante h se le atribuye el valor 0.

Por consiguiente, la teoría cuántica no se reduce a la teoría clásica en el sentido de que la segunda sea lógicamente derivable de la primera, sino que lo que es lógicamente derivable de la cuántica es una aproximación a la clásica sólo si se supone que h es 0; pero este supuesto es inconsistente con el postulado básico de la teoría cuántica, según el cual el *quántum* de acción h tiene un valor finito.

Así, según Murdoch, no es correcto mantener que la teoría cuántica contiene lógicamente la teoría clásica, porque las principales constantes de una teoría son características esenciales de dicha teoría. Y Bohr era consciente de esta incompatibilidad, porque escribió¹³³ :

...en la región límite de los elevados números cuánticos de ningún modo hay una cuestión de una gradual disminución de la diferencia entre la descripción ofrecida por la teoría cuántica de los fenómenos de radiación y las ideas de la electrodinámica clásica, sino sólo de un acuerdo asintótico de los resultados estadísticos.

Así, como ilustración de la idea anterior, Bohr recordaba que los mecanismos de emisión y absorción de radiación son absolutamente diferentes según las dos teorías: en la teoría clásica la emisión es un proceso continuo en el que el átomo emite radiación a las frecuencias propias del movimiento periódico del electrón y, en cambio, en la teoría cuántica la emisión es un proceso discontinuo a una sola frecuencia, es decir, es monocromático y, además, no se encuentra causalmente determinado por el movimiento periódico del electrón.

Pero, según Faye¹³⁴, el principio de correspondencia no puede caracterizarse sólo por la anterior conexión formal y sintáctica entre las dos teorías, desarrollada por Murdoch, porque dicho principio implica también una condición semántica, puesto que el significado de los observables comunes a ambas teorías ha de ser empíricamente el mismo o casi el mismo. Así, la aproximación semántica que propone Faye es la siguiente:

133Murdoch, *Ibid.* (p.40)

134Faye, *Ibid.* (p.117)

Se puede decir que T_2 , que tiene un dominio de aplicación D_2 , se corresponde con una teoría T_1 , que tiene un dominio de aplicación D_1 , si y sólo si se cumplen dos condiciones:

- 1) D_1 y D_2 comparten un dominio común D_c
- 2) cada modelo M_2 de T_2 es isomórfico a un modelo M_1 de T_1 en D_c , pero M_2 de T_2 no es isomórfico a M_1 de T_1 fuera de D_c (considerando un modelo de una teoría a una interpretación bajo la cual los axiomas de dicha teoría son verdaderos)

Esto significa que existe correspondencia entre T_2 y T_1 si todas las interpretaciones de T_1 son isomórficas a las interpretaciones de T_2 en D_c , de manera que T_1 y T_2 son empíricamente equivalentes dentro de D_c , pero diferentes fuera de D_c .

Según Faye, esta aproximación semántica recoge el valor heurístico que Bohr siempre otorgó a su principio de correspondencia. Así no es adecuado hablar de dicho principio como una ley de la naturaleza, pues el principio de correspondencia sólo constituyó una guía metodológica que ayudó a Bohr a construir una teoría cuántica que fuera consistente con la teoría clásica. Cuando Bohr empezó a trabajar en teoría cuántica ésta se hallaba desligada de la mayor parte de conocimientos físicos de la época, estaba separada del resto del sistema científico. Necesitaba hacerlos compatibles (como Einstein también intentó hacer). Y el principio de correspondencia contribuyó en gran manera a conseguir su objetivo, a dar consistencia a la nueva teoría cuántica, a establecer definitivamente la nueva teoría; así, pues, uniendo física cuántica y física clásica, Bohr hizo la física de la época más coherente. Pero quien consiguió realizar su máximo objetivo de establecer de forma rigurosa los fundamentos de una teoría cuántica sistemática, y, por tanto, completamente coherente, fue su discípulo Heisenberg. Y precisamente, de la obra que éste publicó en 1925, Bohr dijo que constituía “una precisa formulación de las tendencias implícitas en el principio de correspondencia”¹³⁵. Posteriormente, Bohr utilizó el principio de correspondencia en un sentido más amplio y general, menos relacionado con la investigación de problemas concretos, a la vez que con su nueva noción de la complementariedad acentuaba más la irreconciliable disparidad entre teoría cuántica y teoría clásica.

135J.Faye, *Niels Bohr: His Heritage and Legacy*, Kluwer Academic Publishers, (p.113)

6. LA COMPLEMENTARIEDAD

6.1 EL CAMINO DE BOHR HACIA LA NOCIÓN DE COMPLEMENTARIEDAD

6.1.1 Bohr ante la hipótesis de los *quanta* de luz

Entre 1913 y 1923 Bohr se dedicó a estudiar la estructura atómica, pero no se interesó por el problema de la naturaleza de la radiación atómica. Así, para Bohr, aunque el átomo emitía y absorbía radiación en *quanta* discontinuos de energía, la energía radiada, en cambio, se transmitía en el espacio a través de frentes de onda continuos; y, por tanto, Bohr no consideraba necesario suponer –como Einstein suponía– que la emisión y la absorción discontinuas de la radiación, en *quanta*, implicaban también necesariamente la propagación discontinua, en *quanta*, a través del espacio. No obstante, la teoría de los *quanta* de Einstein poco a poco iba ganando aceptación; el mismo Bohr escribió:

“Con intuición infalible, Einstein fue llevado, paso a paso, a la conclusión de que cualquier¹³⁶ proceso de radiación implica la absorción o la emisión de *quanta* de luz individuales o “fotones” con energía e impulso respectivamente iguales a

$$E=h\nu \quad \text{y} \quad p=h\sigma ,$$

donde h es la constante de Planck y ν y σ son el número de vibraciones por unidad de tiempo y el número de ondas por unidad de longitud, respectivamente. A pesar de su fecundidad, la idea del fotón implicaba un dilema completamente imprevisto, ya que cualquier representación simple de la radiación es evidentemente irreconciliable con los efectos de interferencia, que representan un aspecto esencial de los fenómenos de la radiación”¹³⁷.

Así, en 1917, Bohr reconocía que Einstein había realizado “un importante progreso en el desarrollo de la teoría cuántica”¹³⁸ al formular las leyes que rigen la emisión y la absorción de radiación por un átomo. Basándose en la noción bohriana de estado estacionario, había deducido de manera

¹³⁶El subrayado es nuestro

¹³⁷N.Bohr, *Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics*, The Library of Living Philosophers, Vol VII, P.A.Schilpp, (1949), (p.202)

¹³⁸Bohr, *Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics*, *Ibid.*,(p. 204)

“simple”¹³⁹ la ley de Planck. Einstein también había mostrado que cuando un átomo absorbe o emite una cantidad de energía $h\nu$ entonces su momento se altera en la magnitud $h\nu/c$, en la dirección de la radiación incidente si se da absorción, en la dirección opuesta a la de la radiación emitida si se da emisión inducida y si la emisión es espontánea, es decir, si no se da ninguna perturbación externa, entonces el momento se altera en una dirección determinada por azar, “en una proporción correspondiente a una cierta probabilidad a priori”¹⁴⁰. Este descubrimiento constituyó un éxito para la teoría de los *quanta*, puesto que, según la electrodinámica clásica, la radiación de un átomo se emite en forma de ondas esféricas y, en consecuencia, no ha de provocar ninguna alteración en el momento del átomo emisor. Sin embargo, Einstein no podía presentar el mecanismo causal que subyace al proceso de la emisión espontánea y, sobre esta dificultad, Bohr decía: “Ante esta situación no se podía intentar un análisis causal de los fenómenos de radiación sino sólo ... estimar las probabilidades de que tuvieran lugar los procesos individuales de radiación”¹⁴¹, ya que “el tiempo y la dirección de los procesos elementales quedan abandonados al azar”¹⁴²; pero Einstein confiaba que en un futuro se pudiera descubrir el mecanismo causal que explicara satisfactoriamente dichos procesos.

Por otra parte, la explicación, ofrecida en 1922, de los experimentos de Compton en términos de la teoría de los *quanta* constituyó otro nuevo éxito para la teoría de Einstein. Compton explicó la alteración de la longitud de onda observada en los rayos X dispersados por electrones con la hipótesis de que los *quanta* de luz de energía $E = h\nu$ y momento $p = h\nu/c = h/\lambda$ colisionan con los electrones y son desviados con una energía reducida $E' = h\nu'$ y momento $p' = h/\lambda'$; así, por la conservación de la energía y el momento en el choque de los rayos X con los electrones, que retroceden, las longitudes de onda de los rayos X se incrementan en una magnitud

$$\lambda'' = \lambda - \lambda' = h/p - h/p'.$$

Pero varios físicos se oponían a esta explicación del efecto Compton. Y entre ellos se encontraba Bohr. ¿Por qué? Porque él no aceptaba los *quanta*, ya que no explicaban el fenómeno de la interferencia. Para Bohr tan sólo se podía hablar de frecuencia ν y longitud λ en términos de la

139Bohr, *Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics, Ibid.*, (p.204)

140Bohr, *Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics, Ibid.*, (p.205)

141Bohr, *Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics, Ibid.*, (p.205)

142Bohr *Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics, Ibid.*, (p.205)

teoría ondulatoria¹⁴³.

Por esta razón Bohr manifestaba, en su discurso del premio Nobel, en 1922:

A pesar de su valor heurístico, no obstante, la hipótesis de los quanta de luz, que es completamente irreconciliable con los llamados fenómenos de interferencia, no puede dar luz a la naturaleza de la radiación. Sólo necesito recordar que estos fenómenos de interferencia constituyen nuestro único medio de investigar las propiedades de la radiación y, por tanto, de asignar un significado más adecuado a la frecuencia que en la teoría de Einstein determina la magnitud del cuántum de luz.¹⁴⁴

El valor heurístico que vemos que Bohr atribuía a la hipótesis de los *quanta* de luz era debido al hecho de que, aunque aceptaba la evidencia del efecto fotoeléctrico, dicha hipótesis, para Bohr, no podía ayudar a solventar el problema de la propagación de la luz, ya que ésta muestra procesos de interferencia y difracción, que, según él, necesitaban una interpretación ondulatoria de la luz.

6.1.2 La hipótesis de Bohr, Kramers y Slater

Hasta 1925 Bohr no estuvo tan preocupado, según Murdoch, por el problema de la dualidad onda-partícula como por el problema de la dualidad continuidad-discontinuidad, porque Bohr consideraba que la teoría cuántica, que implica emisión y absorción discontinuas de radiación, no armonizaba con la teoría electromagnética, que implica emisión y radiación continuas. Bohr se sentía inquieto por esta inconsistencia, que atribuía al *quantum* de acción h , “que impone a cada proceso un elemento de discontinuidad extraño por completo a los principios fundamentales de la física clásica, según la cual todas las acciones han de variar de manera continua”¹⁴⁵

Bohr había rechazado absolutamente la explicación del efecto Compton en términos de la hipótesis de los fotones o *quanta* de luz de Einstein. Y buscó su propia solución al problema de la radiación, la cual consistió en abandonar las leyes clásicas de conservación. Las concepciones sobre la radiación que tenían Einstein y Bohr eran en aquel momento radicalmente diferentes. Para Einstein

143Relata Murdoch que Bohr dijo a Heisenberg, bromeando, que si Einstein tuviera que enviarle un telegrama anunciándole la evidencia de la existencia de los *quanta*, dicho telegrama podría llegarle sólo a través de las ondas, Murdoch, *Ibid.*, (p.22)

144Murdoch, *Ibid.*, (p.20)

145Bohr, Introducción a *La teoría atómica y la descripción de la naturaleza* Alianza Editorial, Madrid, (1988), (p.54)

el modelo de ondas constituía una “imagen metafórica”¹⁴⁶ de las leyes que rigen el comportamiento de los fotones y para Bohr el modelo del fotón era una “imagen metafórica” de las leyes que rigen las interacciones entre radiación y átomos. Bohr pensó que para solucionar el problema de la radiación había de encontrar un mecanismo no clásico que gobernara la interacción discontinua entre materia y radiación, mecanismo que no fuera compatible con la conservación de la energía y el momento. Darwin había sugerido que la incompatibilidad entre teoría electromagnética y teoría cuántica podría desaparecer si la energía se conservara sólo en un promedio de muchos procesos individuales. Einstein ya había intentado demostrarlo pero había abandonado el proyecto en seguida. A Bohr le atraía dicho proyecto y, a finales de 1923, encontró la manera de realizarlo.

Así, en un intento de conciliar la continuidad postulada por la mecánica clásica y la discontinuidad postulada por la teoría cuántica, Bohr, junto a Kramers y a Slater, construyó una teoría que fue presentada en un artículo, escrito totalmente –según mantiene Murdoch¹⁴⁷– por Bohr y Kramers y publicado en 1924¹⁴⁸. Dicha teoría sugería un mecanismo que determinaba las probabilidades de transición entre los estados estacionarios de un átomo, de manera que la energía y el momento intercambiados entre los átomos individuales y la radiación no se conservaba estrictamente en las interacciones individuales, sino tan solo en el valor medio de un conjunto de numerosas transiciones.

Dicho mecanismo se basaba en la noción de un campo de radiación virtual producido por un átomo, puesto que se consideraba el átomo como un conjunto de osciladores armónicos virtuales y se suponía que los átomos se comunicaban entre sí por medio de los campos virtuales de radiación producidos por estos osciladores. Por una parte, el campo de radiación virtual producido por un átomo inducía las transiciones espontáneas entre estados estacionarios de dicho átomo y, por otra parte, el campo de radiación virtual de los otros átomos provocaba las transiciones inducidas a dicho átomo. La relación entre las transiciones de un átomo y las de otro eran puramente estadísticas y, por tanto, no se daba conservación de energía y de momento en los procesos individuales de emisión y absorción. Así pues, en la teoría de Bohr, Kramers y Slater, el experimento de Compton de la colisión de radiación y electrones se veía como un proceso continuo en el que cada uno de los electrones iluminados contribuía emitiendo ondas y cada uno de los electrones tenía una determinada probabilidad de tomar en un instante dado una cantidad discreta de

146Murdoch, *Ibid.*, (p.22)

147Murdoch, *Ibid.*, (p.25)

148Bohr, Kramers & Slater, The Quantum Theory of Radiation, *Phil. Mag.*, **47**, 1924, (p. 790-3)

momento en una determinada dirección, lo cual constituía un proceso discontinuo. Por consiguiente, no se mantenía la ley de conservación de la energía y el momento en cada colisión. Así pues, la relación estadística era la única manera posible de compaginar continuidad y discontinuidad y, además, esta correlación estadística implicaba también una renuncia a la conexión causal, porque la causalidad presupone la continuidad ¹⁴⁹. En conclusión, la substitución de la relación causal por la relación estadística convertía los principios de la conservación de la energía y del momento en teoremas puramente estadísticos.

La teoría de Bohr, Kramers y Slater se podía comprobar en el laboratorio, ya que hemos visto que, en el experimento de Compton, según dicha teoría, había una determinada probabilidad de que un electrón tomara, por unidad de tiempo, una cantidad determinada de momento en una dirección dada. En cambio, la teoría de los fotones de Einstein implicaba que la dirección del electrón que retrocede estuviera determinada estrictamente, no sólo probabilísticamente.

Mientras algunos físicos rechazaban la teoría de Bohr, Kramers y Slater, otros – entre los cuales se encontraban Born y Schrödinger-- la veían con gran interés. Finalmente, Bothe y Geiger realizaron el experimento y observaron que por cada electrón que retrocedía había once fotones dispersados; este resultado era muy improbable si sólo hubiera sido debido a las coincidencias propias del azar; y, por otra parte, Compton y A.W. Simon, también concluyeron, con su experimento, a favor de la teoría de los fotones de Einstein y en contra de la teoría de Bohr. Éste consideraba dichos experimentos como cruciales, antes de que se conociesen sus resultados finales¹⁵⁰; por consiguiente, aceptó inmediatamente las conclusiones que ofrecieron; así pues, al conocer los resultados de Bothe y Geiger escribió en una de sus cartas:”Me parece, por tanto, que no hay nada más que hacer que dar a nuestros revolucionarios intentos un funeral tan honorable como sea posible”¹⁵¹.

6.1.3 Carácter formal de la teoría cuántica

Pero, aunque, ante el fallo de la hipótesis de Bohr, Slater, Kramers, en 1925 Bohr abandonó dicha hipótesis, no por ello aceptó el modelo del fotón. Su respuesta fue que no es posible ofrecer un modelo clásico, es decir, una descripción espacio-temporal, de la interacción entre la radiación y la

¹⁴⁹Según M.Jammer en *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, American Institute of Physics, (1989), (p.188)

¹⁵⁰Murdoch, *Ibid.*,(p.28)

¹⁵¹Murdoch, *Ibid.*,(p.29)

materia. Así, en el artículo en el que reconoció la refutación de la teoría de Bohr, Kramers y Slater, Bohr insistió en el carácter formal de los modelos mecánicos y en los problemas en los que se incurre al intentar usar imágenes visualizables¹⁵²:

Ha de enfatizarse que la cuestión de una relación o de una independencia entre los procesos atómicos individuales observables no puede considerarse simplemente como una distinción entre concepciones bien definidas de la propagación de la luz en el espacio vacío, que corresponde quizás a una teoría corpuscular o a una teoría ondulatoria de la luz. Más bien se refiere al problema de hasta donde son aplicables las imágenes de espacio-tiempo por medio de las cuales se han descrito hasta ahora los fenómenos naturales.

Así pues, la respuesta de Bohr a la refutación de la hipótesis Bohr-Kramers-Slater constituyó el reconocimiento de la limitada aplicabilidad de los modelos clásicos de radiación a los procesos cuánticos, que era debida, no a las dimensiones microscópicas de dichos fenómenos, sino al *quantum* de acción h , que impone a cada proceso atómico individual una discontinuidad que es desconocida en el dominio de la física clásica, en el cual todas las acciones evolucionan de forma continua. Así, según la física clásica, la radiación contiene una energía que se intercambia de forma continua con la materia. Y, como la teoría cuántica postula la discontinuidad, no se la puede interpretar consistentemente con las nociones propias de las teorías clásicas. Por esta razón, argumentaba Bohr, se ha de interpretar la teoría cuántica como puramente formal, en el sentido de que no se refiere a la naturaleza real de los procesos atómicos, sino que sólo ofrece una descripción matemática de las leyes estadísticas que rigen dichos procesos. Así pues, por ejemplo, ya que la noción de frecuencia ν es propia de la teoría ondulatoria, “no hay significado para la cantidad ν sin ondas”¹⁵³, escribía Bohr, y, en consecuencia, la noción del cuanto de luz de energía $E=h\nu$ es meramente simbólica y se limita a “salvar los fenómenos”¹⁵⁴.

También Bohr consideraba puramente formal, sin ningún significado realista, es decir, sin que se refiriera a ningún proceso de la naturaleza, la hipótesis que de Broglie había lanzado en 1925, con la cual la dualidad onda-partícula se ampliaba a toda la materia. Así, según de Broglie, cada partícula está asociada a una onda cuya longitud λ y cuya frecuencia ν , que son proporcionales al momento y a la energía de las partículas de acuerdo a las relaciones $\lambda = h/p$, $\nu = E/p$. Según esta concepción,

¹⁵²Murdoch, *Ibid.*, (p.30)

¹⁵³Murdoch, *Ibid.*, (p.22)

¹⁵⁴En cambio, según Murdoch, Bohr atribuía un significado realista a la teoría electromagnética clásica. Murdoch , *Ibid.*, (p. 21)

la trayectoria de una partícula corresponde al rayo de la onda asociada con ella, es decir, a la recta normal a la superficie equifásica de las ondas. Además, de Broglie sugería que en ciertas circunstancias las partículas mostrarían fenómenos de difracción, por ejemplo, cuando un haz de electrones atravesara un orificio en una pantalla.

Bohr contemplaba la hipótesis de Broglie bajo el mismo punto de vista que la de los *quanta* de luz de Einstein, como consideraba la teoría cuántica en general, simplemente como una hipótesis meramente simbólica, sin atribuirle una interpretación realista. Así, en 1926, Schrödinger, después de haber visitado a Bohr en Copenhague, le escribió una carta que contenía las siguientes palabras “ Me parece que encuentras una especie de lugar de reposo en la concepción de que las imágenes y aparentemente visualizables imágenes sólo se han de tomar en realidad como simbólicas”¹⁵⁵.

Por otra parte, Høffding, al describir una conferencia no publicada que Bohr impartió en 1926, escribió:

...él sospecha que no podemos decidir si el electrón es un movimiento de onda (en cuyo caso no podemos evitar la discontinuidad) o una partícula (con la discontinuidad entre las partículas). Ciertas ecuaciones nos llevan a la primera concepción, ciertas otras a la última...En una conversación que mantuvo conmigo después de la conferencia, el Sr. Bohr me explicó que está convencido de la necesidad de la simbolización si queremos expresar los últimos descubrimientos de la física.¹⁵⁶

Por el término “simbolización” se ha de entender el “uso formal de símbolos matemáticos”, con el rechazo implícito que, según Murdoch, suponía Bohr de una interpretación realista de las relaciones matemáticas que contiene la teoría. Aunque Bohr no publicó casi nada durante este período crucial, sus cartas revelan lo que pensaba, como el siguiente fragmento, extraído de una carta de 1926 dirigida a Darwin:

...es muy interesante ver cómo la noción de corpúsculo u onda se presenta como la más conveniente según el lugar del sistema en el que explícitamente se introduce el fenómeno de la discontinuidad implicada en los postulados. Esto es lo único que puede esperarse, ya que cada noción, o más bien, cada palabra, que usamos se basa en la idea de continuidad y se convierte en ambigua cuando esa idea

155Murdoch, *Ibid.*,(p.44)

156Murdoch, *Ibid.*,(p.44)

falla.¹⁵⁷

Aquí vemos de nuevo que para Bohr los modelos clásicos de onda y de partícula suponían una continuidad espacio-temporal; por tanto, si no se daba continuidad, el término “partícula” y el término “onda” estaban mal definidos y no se podían aplicar de forma inequívoca en cada situación –por ejemplo, en la noción clásica de partícula se presupone la noción de una trayectoria continua en el espacio y el tiempo–.

Así, el testimonio de las cartas de Bohr revela, según Murdoch¹⁵⁸, que éste cambió de actitud ante el problema de la dualidad onda-partícula, porque empezó a manifestar, como nunca anteriormente había expresado, una simpatía hacia la noción de dualidad. Así pues, en el último fragmento citado hemos visto que mantenía que el concepto de onda o el de partícula se mostraba cada uno como el más adecuado dependiendo de la situación concreta en la que nos encontráramos, lo cual constituye un explícito reconocimiento de la dualidad.

En síntesis, la nueva concepción de Bohr se puede sintetizar de la siguiente manera: cuando se puede suponer continuidad es posible aplicar nociones clásicas, es decir, la materia se puede considerar corpuscular y la radiación se puede considerar ondulatoria; pero cuando no se puede suponer continuidad es posible aplicar nociones no clásicas, es decir, entonces la materia se puede considerar ondulatoria y la radiación se puede considerar corpuscular.

6.1.4 El principio de indeterminación

En febrero de 1927 Heisenberg derivó las relaciones entre las indeterminaciones de la posición y el momento y de la energía y el tiempo, $\Delta x \cdot \Delta p_x = \Delta t \cdot \Delta E = h$. Las interpretó de forma que cuanto más exactamente se conoce la posición de un objeto menos exactamente se conoce el momento y cuanto más exactamente se conoce la energía menos exactamente se conoce el tiempo. Bohr lo expuso con las siguientes palabras:

[Heisenberg] señaló que el conocimiento que se puede conseguir del estado de un sistema atómico

157Murdoch, *Ibid.*,(p.45)

158Murdoch, *Ibid.*(p.46)

comporta siempre una “indeterminación” particular. Así, toda medida de la posición de un electrón con la ayuda de cualquier aparato, como, por ejemplo, un microscopio, que utilice una radiación de alta frecuencia, estará obligatoriamente acompañada, según las relaciones fundamentales [$E=h\nu$ y $P=h\sigma$, siendo ν el número de vibraciones por unidad de tiempo y σ el número de ondas por unidad de longitud], de un intercambio de impulso entre el electrón y el aparato de medida, intercambio que será tanto mayor cuanto mayor sea la precisión con la que se intente medir la posición.¹⁵⁹

Heisenberg completó su trabajo mientras Bohr se encontraba en Noruega. Cuando éste regresó mantuvieron intensas discusiones porque Bohr no estaba de acuerdo con la derivación que Heisenberg había realizado de su principio. Éste lo infería a partir de la teoría de la transformación mecánico-cuántica de Dirac-Jordan, porque consideraba que dicha teoría era la que mejor representaba la discontinuidad, Heisenberg atribuía la indeterminación propia del proceso de medida a la discontinuidad inherente a dicho proceso y pensaba que la discontinuidad era la esencia de la teoría cuántica. En cambio, Bohr quería derivar el principio de indeterminación a partir de la mecánica de ondas, porque pensaba que la indeterminación era una consecuencia directa de la dualidad onda-partícula¹⁶⁰; por eso Heisenberg escribió de Bohr que “parecía inclinado a situar la dualidad onda-partícula entre las concepciones básicas de la teoría”¹⁶¹.

Después de varias semanas de discusión, Heisenberg aceptó la propuesta de Bohr y añadió a las pruebas de su trabajo un apéndice en el que reconocía que la crítica de Bohr era adecuada:

...la incertidumbre en la observación no depende exclusivamente de la existencia de discontinuidades sino que está directamente relacionada con la necesidad de hacer justicia simultáneamente a los diferentes datos experimentales que se expresan en la teoría corpuscular, por una parte, y en la teoría de ondas, por otra.¹⁶²

Bohr veía el principio de Heisenberg como un caso especial de su tesis de que la noción clásica de trayectoria no está bien definida en la teoría cuántica porque esta teoría no permite la descripción espacio-temporal clásica. El principio de incertidumbre era, para Bohr, “una consecuencia directa del dilema onda-partícula”¹⁶³ porque éste pensaba que, cuando había discontinuidad, un electrón no

159N.Bohr, *Discussion with Einstein, Ibid.*, (p.208)

160Puede consultarse la derivación que Bohr realizó del principio de indeterminación en N.Bohr *El postulado cuántico y el desarrollo reciente de la teoría atómica* (1927)

161 Murdoch, *Ibid.*, (p.49)

162Murdoch, *Ibid.*, (p.51)

163Murdoch, *Ibid.*, (p.51) de notas manuscritas en danés

podía concebirse adecuadamente como corpúsculo, ya que no se le podía atribuir una localización exacta.

Así, entre 1925 y 1927 Bohr fue aceptando la dualidad onda-partícula¹⁶⁴. El experimento de la difracción de electrones, realizado por Davisson y Germer y publicado en abril de 1927, fue crucial para Bohr, puesto que, habiendo siempre manifestado que los fenómenos de difracción e interferencia necesitan usar el modelo ondulatorio, hubo de admitir que si la materia muestra efectos de difracción entonces, necesariamente, ha de concebirse también en términos ondulatorios .

Por otra parte, el principio de Heisenberg proporcionó a Bohr la idea que definitivamente le permitió acabar con su resistencia ante la dualidad onda-partícula, porque contribuyó a que se diera cuenta de que no sólo si uno de los dos modelos falla se ha de emplear el otro sino que ambos modelos son aplicables sólo en circunstancias mutuamente excluyentes. Es decir, como los dos modelos no se han de aplicar al mismo objeto al mismo tiempo, no son contradictorios. Por tanto, aceptarlos no resulta inconsistente.

Bohr necesitaba no tener sospecha de ninguna posible contradicción entre los enunciados que, como científico, mantenía. Por esta razón, la oposición que veía entre la naturaleza de las ondas y la de las partículas le impidió, durante mucho tiempo, aceptar la dualidad onda-partícula. Pero el principio de Heisenberg le dió la posibilidad de dar consistencia a esta dualidad, porque le permitió ver que puede no haber contradicción entre los dos modelos, ya que nunca se han de aplicar al mismo objeto en el mismo experimento. Así, por ejemplo, los electrones muestran el comportamiento propio de una partícula en multitud de experimentos y, en cambio, en otros muestran el comportamiento propio de las ondas. Es decir, Bohr recibió las relaciones de indeterminación como una potencial respuesta al dilema, como una posible resolución de la paradoja. Así, en 1927, dijo refiriéndose al principio de incertidumbre: "De esta manera, Heisenberg ha sido capaz de elucidar numerosas paradojas a las que dio lugar la aplicación del postulado cuántico y ha probado de forma detallada la ausencia de contradicción en el método simbólico"¹⁶⁵.

Como vemos, Bohr utilizaba reiteradamente la expresión "postulado cuántico", por la cual entendía

164 La creación de la mecánica cuántica, con sus dos teorías que dan idénticos resultados, la mecánica de ondas y la de matrices, también contribuyó a la aceptación de la dualidad onda-partícula por parte de Bohr.

165 N. Bohr, *El postulado cuántico y el desarrollo reciente de la teoría atómica (1927)*, publicado en *La teoría atómica y la descripción de la Naturaleza*, Alianza Editorial, Madrid (1988) (p.116)

el supuesto de que cada proceso atómico está caracterizado por una discontinuidad esencial, o, como él llamaba, por una “individualidad” que no se puede analizar, “noción simbolizada por el *quántum* de acción h ”¹⁶⁶.

6.2 APARICION DE LA NOCIÓN DE COMPLEMENTARIEDAD

El principio de Heisenberg contribuyó¹⁶⁷ a que Bohr concibiera su noción de complementariedad, porque le hizo pensar que, ya que no es posible atribuir dos modelos, como el de ondas y el de partículas, al mismo objeto en el mismo momento, no sólo éstos son necesarios sino que son también, al igual que la precisión de las medidas de posición y las de momento, mutuamente exclusivos, es decir, complementarios. Y Bohr reconoció el valor del principio de Heisenberg con estas palabras:

Una contribución importante al problema de la aplicación no contradictoria de esos métodos [los nuevos métodos simbólicos] ha sido hecha hace poco por Heisenberg, al subrayar, en particular, la peculiar incertidumbre recíproca que afecta a todas las medidas de magnitudes atómicas.

Antes de examinar más de cerca sus resultados será conveniente mostrar cómo el carácter complementario de la descripción de los fenómenos, que se traduce por esta incertidumbre, aparece ya de manera inevitable al analizar los conceptos más elementales utilizados para interpretar la experiencia¹⁶⁸.

Así, en síntesis, la evolución de Bohr hasta este momento se puede resumir así: hasta 1926 Bohr había sido muy escéptico ante la propuesta de la dualidad onda-partícula, puesto que veía en ella simplemente una muestra de la limitada aplicabilidad de los modelos clásicos; hacia finales de 1926 su actitud cambió, puesto que entonces ya admitió que, si fallaba uno de los dos modelos, no era sólo apropiado sino también deseable utilizar el otro. De esta manera, Bohr había llegado a ver una

166N.Bohr, *El postulado cuántico y el desarrollo reciente de la teoría atómica* (1927),(p.99)

167Hay diferencias, entre los estudiosos del pensamiento de Bohr, sobre la valoración de la influencia que el principio de indeterminación ejerció en la génesis de la noción de complementariedad de Bohr. Así, Murdoch (en *Ibid.*, p.54) cree que dicha influencia fue más significativa de lo que cree Jammer (en “The Conceptual Development of Quantum Mechanics”, p.360). Y también J.Whitt-Hansen (1952) y Bedau y Oppenheim (1961) consideran que el principio de Heisenberg motivó la formulación del principio de complementariedad en Bohr, según Jammer cita en *The philosophy of Quantum Mechanics* (p.91). Sin embargo, no penetraré tan profundamente en el complejo tema del proceso de gestación intelectual de la noción de complementariedad en la mente de Bohr.

168N. Bohr. “El postulado cuántico y el desarrollo reciente de la teoría atómica” (1927), publicado en *La teoría atómica y la descripción de la Naturaleza*. Alianza Editorial, Madrid, (1988), (p.102)

de las condiciones de la complementariedad, la de que los dos modelos son necesarios. Finalmente, el principio de incertidumbre, formulado a principios de 1927, le inspiró la segunda condición de la complementariedad, la de que los dos modelos sólo son aplicables en circunstancias experimentales mutuamente excluyentes.

Este mismo año, el 1927, Bohr escribió sobre la noción de complementariedad. En su correspondencia aparece, por primera vez, en una carta a Pauli del mes de agosto:

Lo que escribes sobre tu trabajo y el de Jordan en electrodinámica es extremadamente atractivo y es muy acorde a mi propia concepción sobre la naturaleza de la teoría cuántica, según la cual los aparentemente contrarios requerimientos de la superposición y la individualidad no subsumen aspectos contrarios sino complementarios de la naturaleza.¹⁶⁹

Vemos que en este fragmento, como en otros textos de la misma época, Bohr escribía “superposición” e “individualidad” en lugar de “onda” y “partícula”; así pues, con el término “superposición” se refería a la capacidad que tienen las ondas de interferir entre sí y a la linealidad de las funciones de onda en mecánica de ondas y con el término “individualidad” se refería a la indivisibilidad de las partículas elementales.

La función que ejerció la noción de complementariedad para armonizar de forma coherente las dos naturalezas de la luz fue evidenciada por Bohr con estas palabras:

En realidad, la continuidad espacial de nuestra imagen de la propagación de la luz y la atomicidad de los efectos luminosos son aspectos complementarios en el sentido de que explican características igualmente importantes de los fenómenos de la luz, que nunca pueden estar en contradicción directa entre sí, porque su análisis profundo en términos mecánicos exige dispositivos experimentales que se excluyen mutuamente.

...A primera vista, esta situación puede parecer poco confortable, pero, como ha sucedido a menudo en la ciencia, cuando nuevos descubrimientos han llevado al reconocimiento de una limitación esencial de los conceptos considerados hasta entonces como indispensables, nos vemos recompensados con la ganancia de un punto de vista más amplio y de un mayor poder para correlacionar fenómenos que

¹⁶⁹Murdoch, *Ibid.*, (p.55)

anteriormente se nos podían aparecer como contradictorios¹⁷⁰

Como vemos, el mismo Bohr reconocía que la noción de complementariedad podía resultar incómoda, pero había que aceptarla como un mal menor, para poder integrar, con ella, aspectos de la realidad tan opuestos como inevitables.

Pero, aunque la noción de “complementariedad” es una de las que más a menudo aparece en los trabajos que Bohr realizó a partir de 1927, no se encuentra en ellos una definición clara y unívoca de dicha noción. Así se comprende que Einstein manifestara: ”a pesar del gran esfuerzo que he realizado, he sido incapaz de encontrar la exacta formulación del principio de complementariedad!”¹⁷¹ También resultan ilustrativos unos hechos que cita M.Jammer¹⁷². Con motivo del 70 aniversario de Bohr, en 1955, F.von Weizsäcker escribió un artículo sobre la complementariedad. Para realizarlo, releyó atentamente los escritos de Bohr que se refieren a este tema y llegó a la conclusión de que, durante más de 25 años, había malinterpretado la noción de complementariedad de Bohr. Pensó entonces Weizsäcker que finalmente ya había descubierto el auténtico significado. Sin embargo, al preguntar a Bohr si su interpretación recogía la idea que Bohr tenía en mente, éste le respondió negativamente.

6.3 LA CONFERENCIA DE COMO

La noción de complementariedad fue presentada públicamente por Bohr, por primera vez, en 1927 en su célebre conferencia de Como¹⁷³. El punto de partida de Bohr en dicha conferencia fue el “postulado cuántico”, que él consideraba que constituye la esencia de la teoría cuántica. Según este postulado, los intercambios de energía ocurren sólo a través de transferencias discretas de magnitud finita. Así, cuando se observa un objeto atómico con un instrumento hay un intercambio de energía entre objeto y aparato de observación que nunca puede hacerse nulo; es decir, nunca puede despreciarse, debido a las dimensiones del mundo atómico, al contrario de lo que ocurre en física clásica donde el valor de h es extremadamente pequeño comparado con las acciones implicadas en

¹⁷⁰Bohr, *La llum i la vida*, en *Ibid.*, (p.24)

¹⁷¹A.Einstein, *Reply to Criticisms* Schilpp

¹⁷²M.Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics*(p.90)

¹⁷³Este mismo año Bohr tenía el proyecto de escribir un trabajo sobre los fundamentos filosóficos de la teoría cuántica. Hay en el Instituto Bohr de Copenhague un conjunto de borradores con ese título. Aunque este proyecto nunca se realizó, dichas notas constituyeron la base de la conferencia que Bohr pronunció en Como, en conmemoración del centenario de la muerte de Volta.

nuestras percepciones sensibles.

“Esta situación tiene consecuencias trascendentales”¹⁷⁴, decía Bohr. En primer lugar, “por una parte, la definición del estado de un sistema, tal como se entiende de ordinario, exige la eliminación de toda perturbación externa” y ello hace que el concepto de situación espacio-temporal pierda su sentido habitual y, en segundo lugar, por otra parte,” las interacciones con los instrumentos de observación, que no pertenecen al sistema,” hacen imposible “definir de manera inequívoca el estado del sistema y en consecuencia no puede ser cuestión de la causalidad en el sentido ordinario de la palabra”¹⁷⁵. Veamos qué quiere decir Bohr, según Jammer¹⁷⁶. El estado del sistema es el conjunto de todas las coordenadas de posición y los momentos de las partes del sistema. En mecánica clásica se pueden usar estos datos para predecir las propiedades estructurales del sistema; pero tan solo puede hacerse una predicción si el sistema es cerrado, es decir, si no está afectado por perturbaciones externas, ya que, hablando rigurosamente, no se puede atribuir un estado a un sistema abierto. Ahora bien, se considera que la evolución de las propiedades estructurales del sistema se rige por el principio de causalidad, es decir, que su evolución a través del tiempo constituye su comportamiento causal. Pero en teoría cuántica, por el postulado cuántico, cualquier observación del sistema implica una perturbación. Es decir, cuando se observa un sistema éste se convierte en sistema abierto. La descripción espacio-temporal implica la observación. Al observar la posición se perturba el sistema y dicha perturbación es incontrolable. Por tanto, no se pueden hacer predicciones sobre la evolución del sistema, es decir, sobre su comportamiento causal. De ahí que la causalidad excluya la descripción espacio-temporal y viceversa.

Por otra parte, Murdoch¹⁷⁷ considera que cuando en Como Bohr hablaba de “causalidad” se estaba refiriendo a la necesidad de una descripción causal, entendiendo por ésta el conocimiento de la energía o el momento del objeto. Con esta interpretación se ve claramente que Bohr estaba aplicando directamente el principio de Heisenberg: conocer exactamente la situación impide conocer exactamente el momento y conocer exactamente el tiempo impide conocer exactamente la energía.

174N. Bohr, “El postulado cuántico y el desarrollo reciente de la teoría atómica”, *Ibid.*, (p.100)

175El sentido ordinario de descripción causal era, para Bohr, el de la descripción determinista propia de la mecánica newtoniana; dicha descripción “permite partiendo del estado de un sistema físico definido en un instante dado mediante magnitudes medibles predecir su estado en cualquier instante posterior”, según dijo en 1954 (“La unidad del conocimiento”, *Ibid.*, (p.85)

176Según M.Jammer en *The conceptual development of quantum mechanics*, (p. 366)

177Murdoch, *Ibid.*, (p.54)

Por consiguiente, en teoría cuántica hemos de cambiar la relación entre descripción espacio-temporal y descripción causal, cuya unión es característica de las teorías clásicas y hemos de limitarnos a concebir ambas descripciones como aspectos complementarios de la observación física. Como hemos visto, pues, la primera concepción de la complementariedad presentada públicamente por Bohr se refiere a la imposibilidad de ofrecer simultáneamente descripción causal y descripción espacio-temporal.

A continuación, Bohr aplicó dicha concepción al debatido problema de la doble naturaleza de la luz y de las partículas elementales. Así pues, la teoría ondulatoria describe adecuadamente la propagación de la luz en el espacio y el tiempo; pero para expresar la conservación de la energía y de la cantidad de movimiento en la interacción –y éste es el aspecto causal de los fenómenos ópticos, según Bohr–, como se muestra en el efecto fotoeléctrico y en el efecto Compton, hay que recurrir a la teoría corpuscular del fotón de Einstein. Es decir, si deseamos estudiar las leyes de propagación de la luz en el espacio y el tiempo hay que limitarnos a consideraciones estadísticas, no causales, y si deseamos aplicar el principio de causalidad a los fenómenos luminosos individuales hay que renunciar a la descripción en el espacio y el tiempo. Por consiguiente, es imposible mantener simultáneamente la descripción causal y la descripción espacio-temporal, porque son dos puntos de vista complementarios.

Inmediatamente después, Bohr manifestó que el carácter complementario de la descripción de los fenómenos se traduce en “la peculiar incertidumbre recíproca” – el término “recíproco” es utilizado por Bohr en ocasiones con el significado de “complementario” – que afecta a las medidas cuánticas. Así, para demostrar el principio de indeterminación, Bohr partió de las relaciones $E=h\nu$ y $p=h\sigma$, en las que aparecen contrapuestas las dos concepciones de la luz y la materia, puesto que E y p “se refieren a la idea de partícula y es posible caracterizarlas según el punto de vista clásico por coordenadas espacio-temporales determinadas” y ν y σ ($\sigma=1/\lambda$) “se refieren a un tren de ondas armónicas planas ilimitado en el espacio”. Así vemos que la constante de Planck h establece en estas ecuaciones una relación entre dos descripciones de la naturaleza que son mutuamente excluyentes pero igualmente necesarias. A partir de estas ecuaciones y de forma fundamentalmente diferente a Heisenberg, Bohr derivó las relaciones de indeterminación: $\Delta E \cdot \Delta t = \Delta x \cdot \Delta p_x = \Delta y \cdot \Delta p_y = \Delta z \cdot \Delta p_z = h$, según las cuales una determinación más precisa en la descripción espacio-temporal se acompaña de una indeterminación en la energía y el momento, es decir, una indeterminación en la descripción causal.

En las relaciones de indeterminación Bohr veía una expresión matemática de la precisión máxima con la que pueden medirse simultáneamente las coordenadas espacio-temporales y las componentes de la energía-cantidad de movimiento, ya que:

es posible medir las coordenadas de una partícula con una precisión tan grande como se quiera, utilizando, por ejemplo, un instrumento óptico, siempre que se use en la iluminación radiación de longitud de onda lo bastante corta. Pero entonces, y según la teoría cuántica, la radiación difundida por el objeto sufrirá una variación finita en la cantidad de movimiento tanto mayor cuanto menor sea la longitud de onda de la radiación utilizada”¹⁷⁸

Así pues, al definir el límite hasta el cual pueden aplicarse las nociones complementarias de forma simultánea –aunque no rigurosa–, el principio de Heisenberg contribuía a solventar las paradojas que presentaba la teoría cuántica.

6.4 LA NOCIÓN DE LA COMPLEMENTARIEDAD MÁS ALLÁ DE LA FÍSICA

6.4.1 Extensión de la noción de complementariedad

En posteriores trabajos Bohr aplicó la noción de complementariedad a otros campos diferentes de la física atómica, a la psicología, a la biología, a la antropología....Creía que esta noción que le había sido útil para interpretar los fenómenos atómicos le ayudaría a entender otros fenómenos naturales, humanos y sociales. La lección epistemológica extraída de la teoría cuántica podía extenderse a otros dominios del saber porque, para Bohr, el conocimiento es unitario. Así, la expresión “La unidad del conocimiento” aparece como título de dos de sus artículos y como tema al que se refiere en muchos otros.”El fundamento para esta 'unidad' de las ciencias se basa en el hecho que todas se refieren a la descripción objetiva de los fenómenos que se observan en la experiencia humana”¹⁷⁹. Por consiguiente, ya que todas las ciencias comparten el problema de la observación, todas ¹⁸⁰pueden beneficiarse de la aplicación de los conceptos creados para entender la observación en teoría cuántica, que ha permitido superar el presupuesto clásico según el cual la descripción objetiva

178N.Bohr, “El postulado cuántico y el desarrollo reciente de la teoría atómica”, *Ibid.* (p.107)

179H.J.Folse, *The philosophy of Niels Bohr*, North-Holland Physics Publishing, Amsterdam,(1985) (p.170)

180Bohr mantuvo este punto de vista durante toda su vida. Moore recoge que cuando era joven “soñaba con 'grandes interrelaciones' entre todas las áreas del conocimiento. Incluso había pensado en escribir un libro sobre teoría del conocimiento...Pero la física le había atraído irresistiblemente”, según cita recogida por G.Holton en *Ensayos sobre el pensamiento científico en la época de Einstein*, Alianza Editorial, Madrid (1982),(p.162)

presenta propiedades poseídas por el objeto independientemente de su interacción con el instrumento de medida¹⁸¹. Así, en 1929, Bohr decía al terminar una conferencia¹⁸²:

Mi deseo ha sido, además, insistir, tanto como sea posible, en lo profundamente que han sido sacudidos por los nuevos conocimientos los fundamentos del edificio conceptual sobre los que descansa la representación clásica de la física e incluso todo nuestro modo habitual de pensar

La teoría cuántica nos recuerda que, en determinadas situaciones que dependen de las dimensiones de las acciones, no puede despreciarse la interacción objeto-instrumento, de la misma manera que la teoría de la relatividad nos recuerda que en determinadas situaciones que dependen del movimiento del sujeto no puede despreciarse la velocidad a la que éste se mueve. Bohr reiteró en sus escritos la analogía entre la revolución conceptual que para el ser humano habían significado la teoría de la relatividad y la teoría cuántica.

6.4.2 Psicología

Bohr concluyó su conferencia en Como con estas palabras: “Confío, no obstante, que la idea de complementariedad sea adecuada para caracterizar la situación, que mantiene una profunda analogía con la dificultad general de formación de los conceptos humanos, dificultad que es inherente a la distinción entre sujeto y objeto”¹⁸³.

Estas frases pudieron parecer crípticas la primera vez¹⁸⁴, pero, posteriormente, a la luz de las siguientes exposiciones de Bohr, cuando éste las reiteró, se fueron comprendiendo mejor, puesto que mostró con mayor claridad la relación que mantenían con el postulado cuántico. Así, en teoría cuántica no se puede negligir el intercambio de energía que se da entre objeto e instrumento de medida, porque, por dicho postulado, este intercambio nunca puede ser nulo, sino que siempre es un múltiplo de h . Por consiguiente, se ha de tener en cuenta que el objeto y el instrumento forman una unidad indivisible. Y aplicando estas consideraciones al campo más amplio del conocimiento

¹⁸¹Psicólogos, antropólogos, biólogos y periodistas son algunos de los colectivos que se encuentran a menudo con situaciones en las que cuando los sujetos estudiados saben que son observados alteran su conducta. Por consiguiente, a estos observadores se les plantea la cuestión: ¿qué es lo que observamos?

¹⁸²Bohr, “El cuanto de acción y la descripción de la naturaleza”, conferencia dada en homenaje a Planck(1929)

¹⁸³Bohr, “El postulado cuántico y el desarrollo reciente de la teoría atómica”, *Ibid.* (p.132)

¹⁸⁴Esta es la impresión que producen cuando se leen los escritos de Bohr en orden cronológico. Con el paso del tiempo Bohr mostró más seguridad y transparencia en la expresión de sus ideas.

humano, Bohr llegó a una visión holística de la relación entre objeto y sujeto. Así, se dice¹⁸⁵ que uno de sus aforismos preferidos era el verso de Schiller: “*Nur die Fülle führt zur Klarheit*”, es decir, “Sólo la totalidad conduce a la claridad”

Fue en la conferencia que Bohr pronunció en 1929 cuando se introdujo en el campo de la psicología, dominio al cual también se refirió posteriormente en muchos de sus trabajos. El siguiente fragmento de dicha conferencia constituye una clara exposición¹⁸⁶ de la concepción que tenía el autor sobre nuestra actividad mental¹⁸⁷:

Para describir nuestra actividad mental es necesario que un contenido objetivamente dado sea puesto en presencia de un sujeto observador, mientras que, por otro lado, y según está ya implícito en esa misma afirmación, no es posible establecer una separación precisa entre sujeto y objeto, dado que el sujeto observador pertenece a nuestro contenido mental. De ahí se sigue que el significado relativo de cada concepto, o mejor dicho de cada palabra, no depende sólo de nuestra arbitraria elección del punto de vista sino que, además, debemos estar preparados, en general para aceptar el hecho de que la elucidación completa de un único y mismo objeto puede exigir la adopción de puntos de vista que desafíen una única descripción...

La necesidad de recurrir a este modo de descripción complementario, o recíproco, resulta quizás más familiar para nosotros en los problemas psicológicos.

Bohr en sus trabajos utilizaba a menudo analogías –que el mismo Bohr reconocía a veces que eran “más o menos apropiadas”¹⁸⁸– e ilustraciones que podían parecer extrañas, porque se alejaban del campo de la física; su objetivo era ilustrar sus tesis, que eran nuevas para gran parte del público de la época. Por esta razón, en la conferencia de 1929, presentó ejemplos de experiencias subjetivas:

Cuando se considera esta situación, que nos obliga a renunciar a la necesidad de las representaciones intuitivas que impregnan todo nuestro lenguaje, es muy instructivo constatar que ya en las experiencias psicológicas elementales nos encontramos aspectos fundamentales tanto del modo de razonamiento relativista como del recíproco. La relatividad de nuestra percepción del conocimiento, que se hace

185 G. Holton, *Ensayos sobre el pensamiento científico en la época de Einstein*, Alianza Editorial, Madrid (1982), (p.156)

186 Es la más clara, según la apreciación de Folse en *Ibid.*(p.179)

187 Bohr, “El cuanto de acción y la descripción de la naturaleza”, *Ibid.*,(p.137)

188 Bohr, “El cuanto de acción y la descripción de la naturaleza”, *Ibid.*,(p.140)

familiar ya de niños al viajar en tren o en barco, corresponde, en este orden de ideas, a las experiencias cotidianas relativas al carácter recíproco de la percepción por el tacto. A estos efectos nos bastará con recordar aquí la sensación, a menudo citada por los psicólogos, que se experimenta al intentar orientarse en una habitación oscura sirviéndose de un bastón. Cuando cogemos el bastón haciendo muy poca fuerza, éste se presenta al sentido del tacto como un objeto, pero cuando lo apretamos con fuerza perdemos la sensación de que es un cuerpo extraño y la impresión táctil se traslada de inmediato al punto en el cual el bastón toca al cuerpo que nosotros queremos examinar¹⁸⁹.

Con esta imagen, Bohr pretendía mostrar la unidad que constituyen el objeto y el sujeto, pues no se puede trazar de forma inequívoca la línea que los separa. Un hombre utiliza un bastón para encontrar su camino en una habitación oscura. El hombre y el bastón puede considerarse que constituyen una unidad. La línea que separa objeto y sujeto no está exactamente definida, puesto que, por una parte, la línea divisoria está al final del bastón si el hombre lo sostiene con firmeza pero, por otra parte, si no lo sujeta con fuerza, el bastón parece ser un objeto que la mano examina.

Observaciones similares a ésta siguieron apareciendo en los trabajos de Bohr. Decía: "Es significativo que [...] en otros campos del conocimiento estemos enfrentados a situaciones que nos recuerdan la existente en física cuántica [...]. No tratamos aquí de analogías más o menos vagas, sino de claros ejemplos de relaciones lógicas que encontramos en campos más extensos, en contextos diferentes"¹⁹⁰. Así pues, en otros dominios hay fenómenos que se pueden entender con las nociones de la física cuántica.

Uno de los ejemplos más frecuentes de la aplicación de las relaciones de complementariedad en psicología es la dicotomía que tradicionalmente se ha visto entre el libre albedrío y la causalidad; pues, por una parte, nos sentimos libres al tomar nuestras decisiones y, por otra, nos creemos capaces de intentar realizar un análisis causal de ellas. Pero, ante este análisis causal Bohr nos recuerda que hay que tener en cuenta que, según los descubrimientos de la teoría cuántica, "no es posible establecer con detalle el curso causal de los procesos atómicos ni intentar adquirir un conocimiento cualquiera de tales procesos sin ocasionar una interferencia fundamentalmente incontrolable de su curso"¹⁹¹

189 Bohr, "El cuanto de acción y la descripción de la naturaleza", *Ibid.*, (p.139)

190 Según cita Holton en *Ibid.* (p.140) de "Quantum Physics and Philosophy" (1958)

191 Bohr, "El cuanto de acción y la descripción de la naturaleza", *Ibid.*, (p. 140)

Otro ejemplo es la dicotomía que se ha establecido entre pensamiento y sentimiento, dos nociones que Bohr considera igualmente indispensables para describir la diversidad de nuestra vida psíquica, que “pertenecen a dos situaciones mutuamente excluyentes caracterizadas por un diferente trazado de la línea de separación entre sujeto y objeto”¹⁹²; pensamiento y sentimiento se refieren, pues, a experiencias distintas, que no pueden darse simultáneamente porque cada una de ellas hace una diferente distinción “entre el contenido de la conciencia y el telón de fondo que en términos vagos llamamos el yo”¹⁹³.

La vida mental está llena de ejemplos de nociones complementarias que los grandes pensadores de las diferentes culturas –de la antigua Grecia, de la India, de China,...– a través de la historia han recogido: razón e instinto, contemplación y volición, pragmatismo y misticismo, compasión y justicia. Respecto a esta última dicotomía es significativa la conversación que Bohr mantuvo con J. S. Bruner¹⁹⁴ que éste refiere así:

Bohr me dijo que se había dado cuenta de la profundidad psicológica del concepto de complementariedad cuando uno de sus hijos había hecho algo que no se podía pasar por alto y que él no se sentía capacitado para castigar apropiadamente: “!No se puede conocer a alguien a la luz de la justicia y a la luz del amor al mismo tiempo!”[...] También habló de la manera en que la introspección, como acto, disipaba la misma emoción que uno trataba de describir

Es decir, para Bohr la estricta rigidez de la aplicación de la ley justa impide la benevolencia y el perdón del amor. Y este conflicto entre compasión y justicia es, según Bohr, destacado por la antigua filosofía oriental “cuando nos exhorta a no olvidar jamás, cuando buscamos la armonía en la vida humana, que sobre el escenario de la existencia, somos a la vez actores y espectadores”¹⁹⁵.

Como vemos, Bohr, para enfatizar el carácter universal de la relación de complementariedad, busca paradojas y se recrea explotando las sutilezas que hay en ellas, analiza las posiciones antitéticas y no se preocupa por encontrar una síntesis que las reuna. La psicología le proporciona múltiples ejemplos.

192 Bohr, Causality and complementarity, *Dialectica*, vol. 2, (1948) (p318)

193 Bohr, “Atoms i coneixement humà” (1955), en “Física atòmica i coneixement humà”, *Ibid.*, (p.144)

194 Citada por Holton, *Ibid.*, (p.156). Además, Bruner, en una comunicación privada a Holton, también le comentó que Bohr “tenía una sensibilidad extraordinaria para los problemas psicológicos”

195 Bohr, “La unidad del conocimiento humano”, *Ibid.*,(p.100)

6.4.3 Biología

El padre de Bohr, Christian Bohr, profesor de fisiología en la universidad de Copenhague, había introducido a su hijo adolescente en uno de los debates filosóficos más importantes de fines del siglo XIX, el de las diferencias entre los méritos de las teorías vitalistas y los de las teorías mecanicistas de los seres vivos. Años después, en 1932, Niels Bohr pronunció una conferencia¹⁹⁶ en la sesión inaugural del Congreso Internacional de Fototerapia y, después de mostrar cómo la relación de complementariedad ayuda a entender la doble naturaleza de la luz, pasó a apuntar la aplicación de dicha relación al dominio de la biología, recogiendo de esta forma el enfoque que le había transmitido su padre que, ante el materialismo mecanicista de principios del siglo XX, fue un vigoroso partidario del punto de vista teleológico en el estudio de la fisiología. Christian Bohr argumentaba que, sin conocer la función de un órgano, no se puede conocer la estructura y los procesos fisiológicos que se dan en él.

Estos dos puntos de vista, según Niels Bohr, habían sido presentados en el pasado como radicalmente opuestos entre sí. Y por esta razón se había considerado que o no había espacio para ámbos en la ciencia o uno de ellos había de prevalecer sobre el otro. Mas Bohr mostraba una solución al conflicto: considerar los dos aspectos no como contradictorios sino como complementarios¹⁹⁷. De esta manera se podían incluir ambos enfoques en las ciencias de la vida.

A pesar de que, según Bohr, no se puede otorgar al punto de vista vitalista una expresión precisa porque no se puede definir exactamente qué es la vida y la existencia de la vida ha de considerarse un hecho elemental, es evidente que los órganos de un ser vivo no sólo mantienen una estructura que puede ser descrita por una cadena de causas mecánicas estudiadas por la física y química, sino que, además, la “integridad y adaptabilidad” que caracterizan un organismo vivo requieren, para “una descripción de las funciones internas de un organismo y de sus reacciones ante los estímulos externos”¹⁹⁸, la noción de causa final, extraña a la física y química.

¹⁹⁶ Reproducida en el ensayo titulado “Luz y vida”, publicado en *Física atómica y conocimiento humano*, Aguilar, Madrid (1964)

¹⁹⁷ “En relación con esto, es necesario reconocer que las actitudes llamadas mecanicista y finalista no son puntos de vista contradictorios, sino que presentan una relación de complementariedad ligada a nuestra posición de observadores de la Naturaleza”, escribió Bohr en 1955, en “Átomos y conocimiento”, publicado en “Física atómica y conocimiento humano”, *Ibid.*, (p.113)

¹⁹⁸ Bohr “La llum i la vida”, publicado en *Física atòmica i coneixement humà*, *Ibid.*, (p142)

6.4.4 Antropología

Bohr también aplicó la noción de complementariedad al campo de la antropología. Así, en la conferencia que lleva por título “Las ciencias físicas y las culturas humanas”¹⁹⁹, pronunciada en un Congreso de Antropología y Ciencias Etnológicas realizado en 1938, Bohr manifestaba que las “radicales diferencias” que muestran las diversas sociedades humanas impiden su comparación; pero “la relación de complementariedad es una manera de enfrentarse a esta situación”. Así, las diversas comunidades humanas presentan rasgos tan diferentes que parecen opuestos entre sí pero que son, en realidad, aspectos complementarios del mismo ser humano, aspectos que surgen de manera diferente según sean las circunstancias en las que se encuentre dicho ser humano.

Como vemos, con la noción de complementariedad Bohr relacionaba diferentes áreas del conocimiento en un amplio contexto humanístico. Había escrito casi dos docenas de artículos sobre el tema de la unidad del conocimiento. Y en 1933 había dicho a J.Rud Nielsen: “Creo que mis conclusiones tienen grandes aplicaciones fuera del campo de la física...Me gustaría escribir un libro que pudiese ser usado como texto. Demostraría que es posible llegar a todos los resultados importantes con muy pocas matemáticas”²⁰⁰.

6.5 PENSAMIENTO DIALÉCTICO

El modo complementario de descripción se muestra en la forma dialéctica de pensar y expresarse que tenía Bohr. Así, Rosenfeld, que trabajó muchos años con él, dice: “las inclinaciones [de Bohr] eran esencialmente dialécticas en lugar de reflexivas...Necesitaba el estímulo de alguna clase de diálogo para poner en marcha su pensamiento”. Rosenfeld también recoge una frase que decía Bohr al respecto: “Cada frase mía no debe ser entendida como una afirmación, sino como una pregunta”²⁰¹. Es en el diálogo donde surgen las diferentes posiciones, incluso antitéticas, que muestran los diferentes, incluso opuestos, aspectos de la realidad. Respecto a la noción esencialmente dialéctica de verdad de Bohr, Hans, su hijo, explica que su padre distinguía entre dos clases de verdad: las trivialidades, en las que lo opuesto es absurdo y las verdades profundas, que se

199 Bohr “Les ciències físiques i les cultures humanes”, publicado en *Física atòmica i coneixement humà, Ibid.*, (p. 58)

200 Este libro, que Bohr llamaba su testamento, nunca lo llegó a escribir. Holton, *Ibid.*, (p.162)

201 Holton, *Ibid.* (p.155)

reconocen porque lo opuesto también es una verdad profunda²⁰².

La noción de complementariedad forma parte de una concepción general dialéctica que se encuentra en la historia del pensamiento. En la historia del pensamiento humano se encuentran muchos enunciados de complementariedad. Así hay un testimonio de Filón²⁰³, del siglo I, que dice: “Lo que resulta de dos contrarios es uno; y si lo uno se divide se destacan los contrarios ¿No es éste el principio con el que, por cuanto justamente afirman los griegos, su grande y celeberrimo Heráclito encabezaba su filosofía, el principio que la resume toda y del cual se vanagloriaba como de un nuevo descubrimiento?”. Y es que para Heráclito, del siglo VI a.C., los opuestos son complementarios porque juntos forman una unidad; son tan interdependientes que forman la cara y la cruz de la misma moneda. Uno no se puede comprender sin el otro, ya que constituyen diferentes manifestaciones de la misma realidad. Por eso este filósofo presocrático afirmaba: “Lo mismo es vida y muerte, velar y dormir, juventud y vejez; aquellas cosas se cambian en éstas y éstas en aquéllas”²⁰⁴. “Dios es día-noche, invierno-verano, guerra-paz, hartura-hambre, cambia como el fuego al que, cuando se mezcla con perfumes, se denomina de acuerdo con la fragancia de cada uno de ellos”²⁰⁵. De este punto de vista surge la filosofía dialéctica, según la cual la estructura de la realidad es contradictoria.

M. Jammer²⁰⁶ nos recuerda muchos otros casos de complementariedad en la historia de la filosofía; por ejemplo, cuando Zenón, en el siglo V a. C., estudiaba la flecha que se mueve veía en ella dos aspectos contradictorios: el estado de movimiento que aparece ante nuestros ojos y el estado de reposo en el que, en cada momento infinitesimal, podemos pensar que se encuentra la flecha. Y en la Edad Media la doctrina de la doble verdad atribuida a Averroes enunciaba que dos explicaciones diferentes del mismo tema, la religiosa y la filosófica, pueden ser ambas verdaderas, a pesar de que su conjunción constituya una flagrante contradicción, por ejemplo, la creación del mundo realizada por Dios, según la Biblia, y la eternidad del mundo mantenida por Aristóteles.

202Según dice Holton en *Ibid.* (p.156)

203 Rer. Div. Her., 43

204Kirk Raven, fr. 205

205Kirk Raven, fr.207

206 Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, (p.104)

6.6 VISIÓN CRÍTICA

Se le ha criticado a Bohr²⁰⁷ que haya limitado la relación de complementariedad sólo a dos propiedades, que no la haya ampliado a tres o más. ¿Por qué para dar una descripción hay que ofrecer únicamente dos aspectos complementarios? ¿No se pueden apreciar mayor número de aspectos, que también sean excluyentes y necesarios a la vez?

Realmente en los ensayos de Bohr se encuentran casi siempre los conceptos complementarios presentados en pares. El par más frecuente es el del aspecto ondulatorio y corpuscular de la luz, pero el primero que presentó fue, como hemos visto, el de la descripción espacio-temporal y la descripción causal. Pero en su conferencia titulada “Las ciencias físicas y las culturas humanas” que Bohr concluía extendiendo, como hemos visto, la noción de complementariedad, a las diferencias culturales, ampliaba la posibilidad de encontrar un mayor número de aspectos complementarios²⁰⁸:

La información referida al comportamiento de un objeto atómico...puede caracterizarse como complementaria de cualquier ²⁰⁹información sobre el mismo objeto obtenida por otros medios experimentales que excluyan el cumplimiento de las primeras condiciones...Sólo teniendo en cuenta la relación de complementariedad entre las diferentes experiencias...

No se ha de renunciar al análisis detallado de la riqueza casi avasalladora de nuestra experiencia, que se incrementa continuamente en el mundo de los átomos.

A continuación, Bohr muestra cómo la relación de complementariedad abarcará tantos aspectos de la realidad que será tan útil para explicar el mundo como la relación de causalidad lo ha sido para la física clásica²¹⁰:

Nuestros medios de clasificación y de comprensión no caben dentro de la estructura de la descripción

207 Según M. Jammer en *The Philosophy of Quantum Mechanics* (p. 94). Aquí Jammer manifiesta que la cuestión de por qué la relación de complementariedad ha sido limitada sólo a dos propiedades ha sido explícitamente estudiada por Weizsäcker.

208 Bohr, “Les ciències físiques i les cultures humanes”, publicado en *Física atòmica i coneixement humà*, *Ibid.*, (p. 53)

209 Hemos subrayado los términos que muestran cómo Bohr ampliaba los fenómenos complementarios a más de dos.

210 Bohr, “Les ciències físiques i les cultures humanes”, en *Física atòmica i coneixement humà*, *Ibid.*, (p.54).

causal , que es adecuada sólo cuando el comportamiento de los objetos es independiente de los medios de observación

Y, consciente que parte del público pensaba que la relación de complementariedad no es una noción propia del pensamiento científico, sino que más bien es una noción intuitiva, esto es, ininteligible para la razón analítica, Bohr añadía, como en otras ocasiones en las que también respondía a la posible crítica de misticismo²¹¹:

Lejos de contener algún tipo de misticismo contrario al espíritu de la ciencia, el punto de vista de la complementariedad constituye en realidad una generalización coherente del ideal de causalidad

Así, como vemos, según Bohr, la noción de causalidad quedaba integrada dentro de la noción más amplia de complementariedad.

En otros ensayos Bohr justificaba el fallo de la descripción causal en el mundo atómico argumentando que no se podía hablar de comportamiento autónomo de un objeto atómico, que siempre dependía, de forma no rigurosamente controlable, de los instrumentos de observación. Como no era posible conocer el comportamiento independiente de un objeto no se podía atribuir ninguna causa necesaria a dicha conducta, según el ideal clásico de explicación aceptado en todos los dominios del conocimiento. Por esta razón, según Bohr, resultaba más adecuada la relación de complementariedad, que ofrecía los diferentes aspectos en que aparecían los fenómenos bajo diferentes condiciones, es decir, en diferentes interacciones con diferentes instrumentos. Así, el *abstract* del artículo “Sobre las nociones de causalidad y complementariedad” resume el punto de vista del autor al respecto²¹²:

[este artículo] da ...el fallo del principio de causalidad al enfrentarse con los fenómenos atómicos. Se enfatiza en el hecho de que la individualidad de los procesos cuánticos excluye una separación entre un comportamiento de los objetos atómicos y su interacción con los instrumentos de medida que definen las condiciones bajo las cuales los fenómenos aparecen. Esta circunstancia nos fuerza a reconocer una nueva relación, convenientemente llamada complementariedad, entre la evidencia empírica obtenida bajo diferentes condiciones experimentales.

211 Bohr, “Les ciències físiques i les cultures humanes”, en *Física atòmica i coneixement humà*, *Ibid.*,(p.54)

212 Bohr, “On the notions of causality and complementarity”(1948)

Por otra parte, para Murdoch²¹³, la noción de complementariedad tiene un valor histórico, porque cumplió principalmente una función heurística, ya que, cuando Bohr la introdujo en 1927, ayudó a interpretar los dos tipos de experimentos, los que mostraban la naturaleza ondulatoria y los que mostraban la naturaleza corpuscular de la luz y la materia, y palió la inquietud de los físicos ante el problema de coherencia lógica que creaba la evidencia empírica. Entonces la noción de complementariedad significó un recurso mental útil para mantener, sin interpretación realista, unos modelos de visualización clásicos²¹⁴. Pero dicha noción no llevaba a descubrir nuevas leyes teóricas que permitieran realizar predicciones precisas y contrastables, que es lo que constituye el principal objetivo de la ciencia física, y era posiblemente por esta razón por la cual Einstein decía que no llegaba a comprender el significado de la complementariedad. Finalmente, vemos que la función de la noción de complementariedad que puede perdurar es la de constituir un marco conceptual general con el que entender el mundo, la sociedad y el ser humano bajo sus múltiples y diferentes, incluso opuestas, facetas. Es la visión heracliteana y dialéctica de la complementariedad.

7. PRECEDENTES

Para comprender el pensamiento de Bohr hay que contemplarlo dentro de un contexto humanístico, bajo una perspectiva más amplia que la puramente científica. Por esta razón es significativa la influencia que sobre él ejercieron tres autores: Møller, James y Høffding.

7.1 MØLLER

Decía Bohr²¹⁵ que la noción de complementariedad se había aplicado desde siempre a nuestra experiencia psíquica; así también la noción de separación entre sujeto y objeto se había aplicado a la descripción de los estados de nuestra mente, porque describir la riqueza de nuestra vida psicológica “requiere en varias situaciones una diferente situación de la sección entre sujeto y objeto”. Para ilustrar esta situación, Bohr citaba al poeta y filósofo danés del siglo XIX, P M Møller²¹⁶, en cuya

213 Murdoch en *Ibid.* (p. 78)

214 En éste, como en muchos otros temas, el planteamiento de Bohr es opuesto al de Einstein, quien apostaba por representaciones visuales realistas que no constituyeran meros modelos ideales de representación ficticios.

215 Bohr, “La unidad del conocimiento humano”, *Ibid.*, (p. 65)

216 P.M.Møller (1794-1838) había impartido cursos sobre Hegel en la Universidad de Copenhague, a pesar de que se oponía a él por la abstracción de su pensamiento. En referencia al problema del yo, estaba probablemente inspirado por Fichte, para quien el yo era un perpetuo dinamismo. Møller era amigo de Kierkegaard, con el que compartía su rechazo por el hegelianismo. Kierkegaard había dedicado su obra “El concepto de la angustia” a Møller de quien había dicho que “era la inspiración” de su juventud. El estilo literario de Kierkegaard, que consiste en exponer los

pequeña historia titulada *En Dansk Students Eventyr*, “Las aventuras de un estudiante danés”²¹⁷, se encuentran nociones filosóficas que interesaban profundamente a Bohr, tales como la ambigüedad del lenguaje, la complementariedad y la distinción sujeto/objeto. El mismo Bohr decía que era una novela que “ todavía leían con placer los mayores y los jóvenes ” y que en ella hallaba “una vívida y sugestiva explicación de la interacción que se da entre los diversos aspectos de nuestra posición, iluminada por discusiones en un círculo de estudiantes con diferentes caracteres y divergentes actitudes ante la vida”²¹⁸. Según Rosenfeld²¹⁹, cercano colaborador de Bohr durante mucho tiempo, el carácter dialéctico del pensamiento de éste no provenía de su formación académica sino de sus propias meditaciones, como lo mostraba la fascinación que sentía por dicha novela romántica. Así, en el Instituto, cuando un científico entraba en contacto con Bohr, tan pronto como manifestaba cierto dominio de la lengua danesa, éste le invitaba a leer el pequeño libro, que parecía que formara parte de su iniciación a la institución. La novela presentaba los dilemas de una persona que se encontraba perdida en el laberinto de los muchos egos que la introspección le ofrecía. El autor describía cómo un licenciado, de carácter reflexivo, adicto a las meditaciones filosóficas en detrimento de sus actividades sociales, era criticado por su primo, de carácter práctico, por no haber sabido aprovechar la oportunidad que se le había presentado de conseguir un buen empleo; a lo cual el autor hacía que el licenciado respondiera²²⁰, explicando los problemas que le habían generado sus reflexiones:

Mis interminables indagaciones hacen imposible que yo consiga algo. Además, tengo que pensar en mis propios pensamientos sobre la situación en la que me encuentro. Incluso pienso que pienso en ello y me divido en una secuencia infinitamente regresiva de “yoes” que se consideran uno a otro. No sé en qué “yo” parar y considerarlo como real y en el momento en el que me detengo en uno hay de nuevo un “yo” que se detiene en él. Llego a estar confundido y siento un vértigo como si estuviese mirando a un abismo sin fondo, con lo que mis reflexiones se convierten finalmente en un terrible dolor de cabeza.

Y el primo responde:

propios pensamientos en una mezcla de prosa y poesía, como si de un diario personal se tratara, recuerda el estilo de Møller. Por otra parte, Møller escribía lentamente y rehacía sus obras una y otra vez, hecho que recuerda el modo de trabajar que también tenía Bohr. (A.Finn, volumen 11 de *Collected Works*)

217 A pesar de que esta obra no está terminada, tuvo una gran popularidad y se la considera una de las joyas de la literatura romántica danesa. Aunque todos los estudiosos coinciden en la gran influencia que esta narración ejerció en el pensamiento de Bohr, sólo he podido disponer de algunos de sus fragmentos, puesto que no está traducida.

218 Según cita Jammer en “Conceptual Development of Quantum Mechanics” (p.181)

219 L.Rosenfeld, “Niels Bohr in the Thirties: Consolidation and extension of the conception of complementarity” en Rozental, *Niels Bohr. His life and work as seen by his friends and colleagues*. North-Holland Physics Publishing. Amsterdam (p.121)

220 Bohr, “La unidad del conocimiento humano”, *Ibid.*, (p. 66)

No puedo ayudarte a clasificar tus numerosos “yoes”. Esto está fuera de mi esfera de acción. Y sería o me convertiría en un hombre tan loco como tú si tomara parte en tus sobrehumanos pensamientos. Mi línea es mantenerme junto a las cosas tangibles y caminar a lo largo del ancho camino del sentido común; así mis “yoes” nunca llegan a sentirse confundidos.

Como vemos, estos fragmentos de Møller muestran un análisis introspectivo muy cercano a la concepción que Bohr tenía del conocimiento humano en general y del conocimiento científico en particular, puesto que aluden a los problemas que genera el hecho de que, a diferente línea de separación entre sujeto y objeto, corresponda una diferente observación.

7.2 JAMES

La obra *Principios de Psicología*, el trabajo de psicología más destacado de James, que fue publicado en 1890, también contiene ideas que Bohr manifestó reiteradamente al tratar de las consecuencias que tenía el postulado cuántico en el dominio de la psicología. Por eso, Jammer mantiene²²¹ que James influyó en Bohr, hipótesis compatible con las declaraciones del mismo Bohr en la entrevista²²² que mantuvo con Kuhn y Aage Petersen el día antes de su repentina muerte, en 1962:

K:¿Leyó usted los trabajos de alguno de estos filósofos?

B:Leí algunos...Yo era amigo íntimo de Rubin [un compañero estudiante, más tarde psicólogo]²²³ y, por tanto, leí realmente el trabajo de W.James. W.James es verdaderamente maravilloso por la forma en que aclara...creo que leí el libro o un párrafo que ... se llama “El flujo del pensamiento”, en el que se muestra, de la forma más clara, que es completamente imposible analizar las cosas en términos de...no sé como llamarle, no átomos, quiero decir, simplemente, si se tiene una serie de cosas ... que están conectadas de tal forma que si se trata de separarlas entre sí resulta algo que no tiene nada que ver con la situación real.

221 M.Jammer, *Conceptual Development of Quantum Mechanics* (p.183)

222 Fragmento de la conversación, según Holton en *Ibid.* (p.143)

223 En su tesis doctoral, Rubin presentó, como ejemplo de la percepción de imágenes ambiguas, su famosa figura conocida como el “jarrón de Rubin”, que puede percibirse como un jarrón o como dos perfiles, de manera que una percepción excluye la otra. Obviamente esta imagen recuerda la complementariedad en la percepción de la que hablaba Bohr.

En cambio, Rosenfeld está firmemente convencido de que, aunque hay sorprendentes coincidencias entre ideas de James y de Bohr, aquel no pudo influir directamente en éste por la fecha en la que Bohr conoció los *Principios de Psicología*, que él estima alrededor de 1932, cuando Bohr ya hacía tiempo que exponía aquellas ideas²²⁴. Así, resulta significativo leer, a la luz de la anterior entrevista, el capítulo “El flujo del pensamiento”²²⁵ del libro de James en el que éste insistía en la idea de que el pensamiento sólo puede existir conectado a un “dueño” específico de este pensamiento. Por esta razón, pensamiento y pensador, sujeto y objeto, se encuentran íntimamente entrelazados y, por consiguiente, no se puede objetivar el pensamiento.

Además, para James, la conciencia, no se puede dividir en átomos mentales, porque fluye continuamente, pero tiene un aspecto discontinuo, los cambios, de un momento a otro, en los estados de la conciencia. Así, se puede establecer una analogía –como diría Bohr– entre los bruscos cambios de estados mentales que menciona James y los saltos instantáneos que se dan entre los estados estacionarios del electrón en el átomo de hidrógeno de Bohr. Escribe James: “al igual que la vida de un pájaro, [el pensamiento] parece estar hecho de una sucesión de vuelos y descansos que se alternan entre sí...Podemos llamar a las zonas de descanso 'partes sustantivas' y a las zonas de vuelo 'partes transitivas' del flujo del pensamiento”.

Pero aquí aparecen las dudas que atormentaban al licenciado de la historia de Møller al “considerar introspectivamente las partes transitivas en lo que son. Si son vuelos hacia las conclusiones, pararse en ellas para mirarlas antes de alcanzar una conclusión equivale realmente a aniquilarlas”²²⁶. Y si se espera el momento en el que la conciencia esté de nuevo en estado de reposo ya no se puede observar el vuelo. James expresa vívidamente esta situación:

Dejemos que alguien intente seccionar un pensamiento por la mitad y echar un vistazo al corte y verá lo difícil que es la observación introspectiva de la región transitiva... O si nuestro propósito es suficientemente vivo y lo reprimimos, cesa inmediatamente de ser lo que era...Intentar un análisis introspectivo en estos casos es de hecho como ... tratar de encender la luz rápidamente para ver como es la oscuridad.

224 Nos encontramos, pues, en diferentes áreas, los mismos contenidos conceptuales, los mismos *themata*, en el sentido de Holton, del cual más adelante trataremos. Holton *Ibid.* (p.145)

225 W.James, *Principios de Psicología*, Fondo de Cultura Económica, México, D.F. (1989)

226 Citado por Bohr, en “La unidad del conocimiento humano” (p.13)

Es decir, pensar y analizar el pensamiento, al igual que sentir y observar el sentimiento, son dos situaciones mutuamente excluyentes. Este es el punto de vista que adoptó Bohr cuando ofreció²²⁷ el siguiente ejemplo de complementariedad en la percepción: la experiencia emocional de una pieza de música impide su análisis consciente, mientras el análisis excluye la experiencia emocional.

Así, James también había llegado a una noción de complementariedad en psicología, que expuso en el capítulo "La relación entre las mentes y las otras cosas", en la sección de la histeria, donde indicaba que Janet y Binet

han mostrado que durante los intervalos de anestesia y, coexistiendo con ella, la sensibilidad de las partes anestesiadas también está presente en forma de una conciencia secundaria totalmente separada de la primaria o conciencia normal, pero susceptible de ser extraída y de evidenciar su existencia²²⁸

Además, hay personas que padecen histeria y sólo pueden sentir ciertas sensaciones en uno u otro modo de conciencia, pero no en ambos simultáneamente. Así, James cita el siguiente ejemplo:

Janet ha demostrado esto de forma elegantísima en Lucie, uno de sus sujetos. El siguiente experimento sirve como muestra de todos los demás: durante el trance cubrió su regazo con cartas, cada una de las cuales llevaba un número. Le dijo entonces que al despertarse no vería ninguna carta cuyo número fuese múltiplo de tres. Esta es la que se llama normalmente "sugestión posthipnótica", bien conocida actualmente, y para la que Lucie constituía un sujeto bien adaptado. De acuerdo con esto, cuando fue despertada y se le preguntó sobre las cartas que tenía en el regazo, las contó y dijo que veía solamente aquellas cuyo número no era múltiplo de tres. Era ciega al 9, 12, 18, etc. Pero cuando el yo subconsciente fue interrogado siguiendo el método usual de ocupar al yo superior con otra conversación, la mano escribió que las únicas cartas en el regazo de Lucie eran las numeradas 9, 12, 18, etc y al pedirle que cogiese todas las cartas que había allí, recogió éstas y dejó las otras. Análogamente, cuando se le sugería a la Lucie subconsciente la visión de ciertas cosas, la Lucie normal se quedaba de repente total o parcialmente ciega.

...

Debe admitirse, por tanto, que, al menos en ciertas personas, la posible conciencia total puede escindirse

²²⁷ *Collected Works*, General Introduction, XLVI.

²²⁸ W. James. *Principios de Psicología*. (p. 205), *Ibid*.

en dos partes, que coexisten pero que se ignoran mutuamente y comparten los objetos de conocimiento entre sí. Más notable todavía es que son complementarias. Demos un objeto a una de las conciencias y eso mismo hace que lo retiremos de la otra u otras.²²⁹

Como vemos, no deja de sorprender la analogía entre el uso del término “complementario” que primero hizo James y después Bohr, analogía que sustenta la hipótesis de Jammer sobre la influencia directa del psicólogo americano en el físico danés.

Pero hay una tercera hipótesis, la de Folse²³⁰, quien mantiene que James influyó en Bohr mucho antes de que éste leyera el libro de aquel. Folse se basa en el hecho que Høffding, mentor y profesor de Bohr, había visitado James en América en 1904. Folse cree que entonces Høffding puso a James al corriente de la obra de Kierkegaard, en la que se rechaza el intento hegeliano de incluir toda la realidad en un único sistema conceptual, y ambos pensadores, que rechazaban la metafísica idealista, congeniaron inmediatamente. Cuando Høffding regresó a Copenhague debió de comentar las ideas de James, que le fascinaron, a sus alumnos y a sus amigos (entre los cuales estaban los Bohr, padre e hijo). Además, en la última entrevista que Bohr mantuvo hemos visto que habla de su amigo el psicólogo Rubin, al que inmediatamente relaciona con James. Es muy posible que éste también conociera los “Principios de la Psicología”, libro que adquirió gran prestigio, y le hablara de él en sus reuniones del Círculo Eklíptico, club de estudiantes del que ambos eran miembros. Por consiguiente, es muy probable que Bohr conociera las ideas de James a través de Rubin y de Høffding.

7.3 HØFFDING

Al leer a Høffding se encuentran continuamente los temas filosóficos que preocupaban a Bohr y se reconocen las típicas respuestas bohrianas que se consideran representativas del pensamiento de Bohr, mucho más conocido que su mentor. El mismo Bohr reconoció la influencia que Hoffding había ejercido sobre él en múltiples ocasiones y sobre ella el mismo Høffding escribió: “Bohr declara que ha encontrado en mis libros ideas que han ayudado a los científicos a “entender” su trabajo y que han sido, por tanto, verdaderamente útiles. Esta es una gran satisfacción para mí”²³¹

²²⁹W.James. *Principios de Psicología*. (p. 206-7), *Ibid*.

²³⁰ Folse , *Ibid.*, (p.49)

²³¹ Carta de Høffding a Meyerson, escrita el 13 de mayo de 1928, que es citada por Holton en *Ibid* (p.150)

Se ha considerado ²³² que Høffding fue el mentor de Bohr, porque fue amigo de su padre, fue su profesor en la universidad y fue, durante toda la vida, su amigo, con el que siempre mantuvo un intenso diálogo intelectual. Además, hay unanimidad entre los estudiosos: Høffding fue el único filósofo del cual Bohr recibió influencia directa y la filosofía que le presentó Høffding fue la principal fuente de inspiración del pensamiento filosófico de Bohr.

La filosofía de Høffding se encuentra desarrollada de forma sucinta y didáctica –no olvidemos que, ante todo, Høffding es profesor de filosofía– en *Los Problemas de Filosofía*²³³, que, a propuesta de James, fue traducido al inglés. James y Høffding se admiraban mutuamente y su pensamiento filosófico tiene muchos elementos en común.

El principal objetivo de la epistemología, tema prioritario de Høffding, era para él, como para Bohr, descubrir los presupuestos básicos sobre los que se construye la comprensión de nuestra experiencia. Esta concepción de la epistemología provenía, como Hoffding admitía, de Kant. Pero, según Høffding, Kant se equivocaba al creer que los presupuestos fundamentales del conocimiento humano son necesarios y universales; sin embargo, Kant, según Høffding, tenía razón al mantener que la unidad y la continuidad son esenciales para nuestra comprensión de la experiencia. Así, Høffding escribía: “Nuestra mente sólo puede entender por síntesis y el principio de continuidad es, por tanto, el presupuesto, la hipótesis que funciona en toda la ciencia”²³⁴. Por esta razón, la dualidad que presenta el mundo entre continuidad y discontinuidad constituía, para Høffding, un grave problema filosófico.

Por otra parte, Høffding rechazaba el criterio de la verdad como correspondencia porque los seres humanos no somos capaces de comparar pensamiento y cosas, tan solo podemos comparar pensamiento y experiencia. Porque, para Høffding²³⁵, la comparación era la forma fundamental de la actividad cognitiva; tanto en la percepción como en la asociación de ideas – por ejemplo, en la búsqueda de las causas–. Pero lo que tiene que ser objeto de comparación ha de ser contrastado con algo, que es similar o diferente de él. Por tanto, lo que no tiene nada fuera de él no puede ser entendido con nuestra facultad de conocer. Por esta razón escribía Høffding²³⁶:

232 Como Faye en *Ibid.*

233 H.Høffding, *The Problems of Philosophy*, trad. G.M.Fisher, MacMillan, New York, 1905

234 Høffding en *Ibid.*, (p.60, 75)

235 Høffding en *Ibid.*, (p.216)

236 Høffding en *Ibid.*, (p.217)

La respuesta popular a la pregunta de qué da verdad a nuestro conocimiento es: "nuestro conocimiento es verdadero cuando está de acuerdo con la realidad". Pero ¿cómo podemos determinar esto? Sólo conocemos la realidad a través de nuestras sensaciones e ideas; porque de nuestras sensaciones atribuimos a los objetos ciertas cualidades (luz y oscuridad, color, sonido, calidez, frío, olor y sabor, etc). Pero estas cualidades no pertenecen a los objetos mismos; están en el lenguaje en el que los describimos de acuerdo a la manera en la que afectan a nuestro organismo...

No tenemos realmente, entonces, sensaciones de las cosas sino que nuestras sensaciones corresponden a la condición producida en nuestro cerebro cuando los efectos son transmitidos a él desde el objeto...

Para usar el criterio popular para la verdad de nuestro conocimiento necesitaríamos ir tras nuestra propia conciencia y poder comparar el objeto con la imagen o noción que tenemos de él en la conciencia; pero esto es imposible porque es contradictorio en sí mismo...

Cuando decimos que corregimos nuestras nociones por comparación con la "realidad" queremos decir con "realidad" no algo independiente de la conciencia sino sólo percepciones más definidas y completas que las que hasta entonces teníamos. Pero si tomamos la suma de todas nuestras actuales y posibles sensaciones e ideas y preguntamos cómo están relacionadas con la realidad alcanzamos los límites de nuestro conocimiento.

Así, para Høffding, la verdad de un enunciado no es su "conformidad a un orden absoluto de cosas" sino que nosotros enunciamos proposiciones verdaderas cuando encontramos enunciados que conectan el mayor número posible de fenómenos. La verdad es dinámica, cambiante, puesto que en esencia constituye la capacidad de un enunciado para funcionar; la verdad es también una noción simbólica, puesto que no indica una absoluta similaridad sino una analogía relativa entre pensamiento y objeto²³⁷. Así pues, los conceptos son símbolos de la realidad por medio de los cuales ordenamos nuestras experiencias. Además, según Høffding, no hay un solo sistema de conceptos que pueda ordenar nuestras experiencias de forma adecuada; hay muchos. Un sistema conceptual es adecuado si es consistente y si es capaz de representar nuevos fenómenos²³⁸. Esta concepción²³⁹ de Høffding era similar a la de James, quien mantenía que las teorías son "instrumentos" y "modos mentales de adaptación a la realidad", cuyo valor reside en su funcionalidad para ordenar las experiencias, y consideraba que la noción de realidad, independiente de las experiencias

237 Høffding en *Ibid.*, (p.81)

238 Høffding en *Ibid.*, (p.90)

239 Según Murdoch en *Ibid.*, (p.227)

particulares, es tan sólo un recurso mental, una idea “regulativa”. Sin embargo, el instrumentalismo de Høffding no era tan fuerte como el de James, porque Høffding mantenía que la realidad es de alguna manera inteligible, es decir, hasta cierto punto podemos penetrar en la realidad misma. Y fue la actitud de Høffding la que adoptó Bohr.

Encontramos reiteradamente el concepto de analogía en los textos de Høffding, quien afirmaba, como hemos visto, que la analogía es muy útil para la descripción y el descubrimiento en la ciencia y que la teoría atómica y la concepción mecánica de la naturaleza son “grandes analogías”²⁴⁰. También sobre este tema trató Bohr en una carta²⁴¹ que escribió a Høffding, en los años 20, cuando sus modelos atómicos, que habían tenido un gran éxito, se enfrentaban con serias dificultades:

La cuestión de la influencia de la analogía en las investigaciones científicas en la que tu insistías es, sin ninguna duda, una característica esencial de todos los estudios en las ciencias naturales, incluso si no siempre destaca. A menudo es absolutamente posible hacer uso de una imagen geométrica o aritmética que cubre el problema en cuestión de manera tan clara que las consideraciones casi adquieren un carácter puramente lógico. En general, y particularmente en algunos nuevos campos de la investigación, se debe mantener en la mente la obvia o posible inadecuación de la imagen y, en cuanto se muestran como analogías, hay que estar contento si está fuera de duda su utilidad en el área en la que se usan. Tal es el estado de cosas que se ve desde el punto de vista de la actual teoría atómica. Aquí nos encontramos en la peculiar situación de que hemos adquirido información sobre la estructura del átomo que puede considerarse tan cierta como cualquiera de los hechos de la ciencia natural. Por otra parte, nos encontramos con dificultades de naturaleza tan profunda que no podemos ver ninguna manera de solventarlas; en mi opinión personal, estas dificultades son de tal magnitud que escasamente nos permiten alguna esperanza de conseguir en el reino atómico una descripción en el tiempo y en el espacio que relacione nuestras ordinarias impresiones sensoriales. En estas circunstancias se ha de tener en mente que se está trabajando con analogías

En este fragmento vemos que la actitud de Bohr ante los modelos científicos era extremadamente prudente. Manifestaba con espíritu realista que “hemos adquirido información sobre la estructura del átomo”, pero era consciente de las dificultades que presentan los modelos que utilizan las ciencias de la naturaleza y dudaba de que fuera posible construir modelos completos y realistas del átomo. Por esta razón Murdoch²⁴² sostiene que Bohr mantiene un realismo tímido y circumspecto.

240 Høffding en *Ibid* (p.31, 122) y Høffding en “Analogy and its Philosophical Importance”, *Mind*, **14**, 199-209, 1905, artículo citado por Murdoch en *Ibid.* (p.76)

241 Carta del 22 de setiembre de 1922, citada por Murdoch en *Ibid.* (p.76)

242 Murdoch, *Ibid.*, (p.77)

Así, por ejemplo, Bohr mantenía que la noción de estado estacionario del átomo y la de partícula elemental son sólo recursos útiles para expresar de forma consistente “aspectos esenciales de los fenómenos”²⁴³; pero hemos de alejar de nuestra mente cualquier duda que se nos presente sobre la existencia de los átomos, puesto que ya hemos conseguido un detallado conocimiento de su estructura interna. Así, para Bohr, las analogías y los modelos nos ayudan a construir teorías que nos permiten explicar y predecir los fenómenos que podemos percibir y su éxito se debe al hecho de que representan aspectos de las entidades reales que subyacen bajo los fenómenos.

La filosofía de la física que Bohr adquirió de Høffding es pragmatista²⁴⁴ porque, de la misma manera que para éste la física cumplía la función de ofrecer una organización económica de la experiencia²⁴⁵, Bohr escribía que “la ciencia trata de desarrollar métodos generales para ordenar la experiencia humana común”²⁴⁶. Según Høffding, el éxito de la concepción mecánica de la naturaleza era debido a la noción matemática de la continuidad con la que operaba, pero no había auténtica justificación para admitir que las propiedades cuantitativas que ofrecen las nociones físicas “expresan las esencias más internas de las cosas“, porque las nociones de la física matemática eran tan solo símbolos o imágenes útiles; y, según Hoffding, no podía atribuirse²⁴⁷ validez universal al principio de causalidad, que se basaba en la noción de continuidad y era fundamental en la visión mecánica de la naturaleza.

Además, Høffding mantenía –como después mantuvo también Bohr– que hay un elemento de irracionalidad en la relación que se establece entre el pensamiento y la realidad, entre el sujeto y el objeto, porque Høffding consideraba irracionales el hecho de que “el ser pueda poseer atributos que no es posible que sean comprendidos o definidos a través de las dimensiones en las que nuestro pensamiento puede moverse”²⁴⁸ y el hecho de que “haya límites al grado de continuidad que el pensamiento puede establecer entre experiencias”²⁴⁹. Al mantener que no puede conseguirse la absoluta continuidad y que ningún sistema conceptual de nuestro pensamiento es adecuado para comprender toda la realidad, Høffding, según Murdoch²⁵⁰, estaba acercándose a Kiekegaard, quien

243 Bohr “La teoría atómica y la descripción de la naturaleza”, *Ibid.*

244 Murdoch, *Ibid.*, (p. 227)

245 Considerando como “organización económica de la experiencia” la que obedece el principio de economía, según el cual si hay dos modos de pensar que consiguen el mismo resultado en cuanto a poner en orden los datos empíricos hay que preferir el modo de pensar que utiliza el menor número de medios conceptuales

246 Bohr, “Unidad del conocimiento” (1954), publicado en “Física atómica y conocimiento humano”

247 Murdoch, *Ibid.*, (p.228)

248 Hoffding, *Ibid.*, (p.114)

249 Murdoch, *Ibid.*, (p.228)

250 Murdoch, *Ibid.*, (p.228)

manifestaba que la realidad tiene tantas diferencias y contradicciones que ningún único sistema de pensamiento puede representarla adecuadamente. Cuando Høffding explicaba la filosofía de Kierkegaard escribía²⁵¹:

La dialéctica cualitativa [términos con los que Kierkegaard llamaba a su pensamiento] resalta en la teoría del conocimiento de Kierkegaard por la oposición profunda del pensamiento con la realidad. Aun cuando el pensamiento encuentre un encadenamiento, no se dice que pueda sostenerse en la práctica de la vida... un sistema de pensamiento que abarque la realidad es igualmente imposible... Hay tan grandes diferencias y tan grandes oposiciones, que no se puede encontrar ningún pensamiento que pueda incluirlas todas en una “unidad superior”

Estas palabras muestran una concepción filosófica cercana a la noción de complementariedad de Bohr; con esta mirada dialéctica contemplaba Bohr el problema de las dos naturalezas de la luz y la materia, la de onda y la de partícula. Bohr, en su juventud, se había sentido impresionado por los escritos de Kierkegaard, a pesar de que no compartía muchas de sus ideas²⁵². Bohr leyó a Kierkegaard y a Høffding con los ojos de un físico que se esforzaba por encontrar una coherencia entre la nueva física cuántica y la física clásica en puntos paradójicos que provocaban la confusión y, en ocasiones, la desesperación a muchos de los físicos de la época²⁵³.

Y con ideas próximas a las de Kierkegaard, autor romántico y precursor del existencialismo, Høffding había elaborado una filosofía de la ciencia, que se muestra claramente en el siguiente fragmento²⁵⁴:

Es ahora más y más admitido que la importancia de los principios científicos y filosóficos consiste en esto, que nos dirigen en nuestro esfuerzo de comprender. Su verdad es su validez y su validez es probada por su capacidad de dirigirnos en nuestro trabajo intelectual. Un principio es verdadero si puede ser aplicado, si podemos trabajar con él, es decir, si se gana comprensión con su ayuda. La verdad es un concepto dinámico; se manifiesta a sí misma en el funcionamiento de nuestro pensamiento. Y es un concepto simbólico, porque sólo presupone una analogía, no una identidad entre pensamientos y hechos. Esto se mantiene de la verdad de nuestras cualidades sensibles; tienen valores objetivos como

251 Høffding, *Historia de la filosofía moderna*, vol.II, versión castellana de P.González-Blanco. Editor D.Jorro, Madrid (1907)

252 Murdoch en *Ibid.* (p.228) cita los autores que han tratado este tema: Rozental, Nielsen, Holton, Feuer

253 Es el punto de vista de Holton en *Ibid.*(p.154) cuando observa un paralelismo entre el énfasis que Kierkegaard pone en la discontinuidad, el “salto” y la función del sujeto con los saltos cuánticos, el probabilismo y la descripción dependiente del observador propios de la interpretación de la escuela de Copenhague

254 Høffding, *Ibid.* (p.91)

símbolos, pero no se puede probar que sean imágenes de cosas. Se mantiene también de la verdad de nuestros principios lógico-formales, del principio de causalidad, etc. No podemos comparar nuestras sensaciones y nuestros principios con un orden absoluto de las cosas.

Vemos aquí el componente pragmatista²⁵⁵ que veremos que también contiene la filosofía de la ciencia de Bohr²⁵⁶.

8. EL DEBATE BOHR-EINSTEIN

8.1 LA OPOSICIÓN ENTRE BOHR Y EINSTEIN

La incomprensión por parte de Einstein fue una de las mayores frustraciones intelectuales que sufrió Bohr²⁵⁷. Precisamente, como sabemos, Einstein y Bohr, junto a Planck, habían sido los fundadores de la teoría cuántica y cada uno de ellos había manifestado públicamente su reconocimiento por el trabajo científico del otro. Pero Einstein nunca admitió las revolucionarias conclusiones a las que Bohr y muchos físicos cuánticos habían llegado respecto a los fundamentos epistemológicos y la interpretación de dicha teoría. Se podría decir que Einstein no aceptó la lección epistemológica que la teoría cuántica ofreció a Bohr o que no la entendió como éste. Así pues, Einstein en el postulado cuántico y en el resto de descubrimientos de la teoría cuántica no encontró suficientes razones para renunciar a unos principios de la epistemología de la física clásica que siempre se habían mostrado tan fructíferos –incluso en su, también revolucionaria, teoría de la relatividad–.

Las debilidades que Einstein veía en la teoría cuántica se pueden resumir así:

Einstein no se conformaba con ver la naturaleza ondulatoria y corpuscular como dos aspectos complementarios de la realidad sino que buscaba explicar la naturaleza ondulatoria de la luz a partir

255 En Høffding, como en Bohr, vemos elementos instrumentalistas y pragmatistas. Instrumentalismo y pragmatismo son muy cercanos, si entendemos por instrumentalismo la concepción según la cual las construcciones teóricas son recursos para la investigación y la predicción de los fenómenos y por pragmatismo la concepción más general según la cual el valor de dichas construcciones teóricas es su funcionalidad práctica, es decir, su utilidad para conseguir el objetivo propuesto. Ambas concepciones tienen en común el supuesto de no aceptar que las construcciones teóricas pueden representar la realidad.

256 Por textos como éste, Murdoch considera que el elemento pragmatista que hay en el pensamiento de Bohr proviene de Høffding, no de la filosofía pragmatista de James, como mantienen otros estudiosos del tema, por ejemplo, Stapp. Murdoch, *Ibid.*, (p. 229)

257 En su última entrevista las personas que Bohr más mencionó fueron Heisenberg y Einstein

de la teoría corpuscular.

Einstein no se conformaba con dejar al azar los procesos fundamentales de la naturaleza. Aunque él había utilizado las probabilidades en su trabajo sobre la emisión espontánea de radiación del átomo, no se sentía satisfecho, porque no había podido encontrar una explicación causal de dicho proceso. Así, Bohr había renunciado al principio de la causalidad, pero Einstein no podía prescindir de él y, en consecuencia, pensaba que había que seguir buscando un nuevo marco conceptual que permitiera la descripción de los fenómenos en términos de causa y efecto.

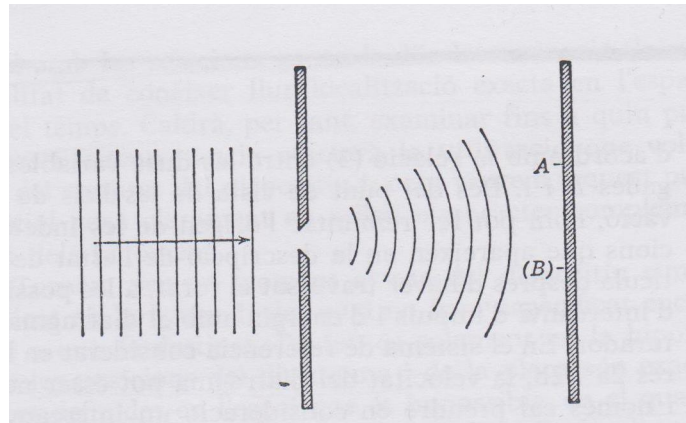
Einstein no se conformaba con el concepto de "fenómeno" de Bohr, que incluía los instrumentos de la observación; para Bohr no se podía distinguir entre fenómeno e instrumento de observación. En cambio, para Einstein construimos teorías científicas para representar la realidad tal como es, independientemente de si es observada o no. Por consiguiente, para Einstein había que seguir buscando un nuevo marco conceptual, es decir, una nueva representación de relaciones entre los hechos de la experiencia, que permitiera la descripción de los hechos de la naturaleza al margen de las condiciones de observación.

Einstein no se conformaba con la descripción de la realidad que ofrecía la mecánica cuántica, porque no le parecía que esta teoría fuera completa. En el artículo EPR, donde presentaba esta crítica, Einstein mostraba también que no aceptaba las relaciones de indeterminación como un principio último y definitivo. Por esta razón, Einstein se esforzó por diseñar experimentos mentales que le permitieran medir con precisión las propiedades de los objetos. A estos diseños, como veremos, respondió Bohr con nuevos diseños para defender las relaciones de indeterminación.

Estos defectos que Einstein atribuía a la teoría cuántica salieron a la luz en el célebre debate Bohr-Einstein, que se inició en el mes de octubre de 1927 en el Congreso Solvay de Bruselas, en el que Einstein manifestó la inquietud²⁵⁸ y preocupación que sentía por ver hasta donde había llegado la teoría cuántica en su abandono de toda descripción causal en el espacio y el tiempo – precisamente causalidad y representación espacio-temporal eran características fundamentales de los presupuestos realistas de Einstein–.

258 El mismo Bohr lo explica en "Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics"(1949), uno de los trabajos más representativos de su autor, *Ibid.*,(p.76)

Para ilustrar su posición, Einstein presentó el ejemplo de una partícula –electrón o fotón– que atravesaba, por un orificio, un diafragma situado, a cierta distancia, ante una placa fotográfica. Según Bohr, “por la difracción de la onda inherente al movimiento de la partícula” no se podía predecir con certeza el punto de la placa al que la partícula llegaría, sólo se podía calcular la probabilidad de que llegara a una determinada región. Pero Einstein quería ir más allá de esta descripción probabilística que ofrecía la mecánica cuántica y por esta razón proponía lo siguiente: medir la transferencia de impulso y de energía que la partícula producía en el diafragma para, por las leyes de la conservación de la energía y el momento, conocer la dirección que tomaría la partícula desde el orificio hasta la placa y así determinar el punto de la placa al que la partícula llegaría

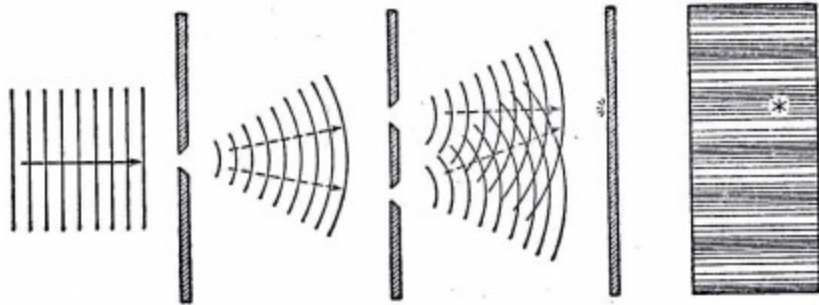


En un principio, Bohr aceptó la propuesta de Einstein, puesto que el experimento parecía simplemente una aplicación de la teoría del efecto Compton²⁵⁹, pero después Bohr mostró que para medir el impulso transmitido por la partícula al diafragma y así poder predecir la dirección de la trayectoria seguida por la partícula desde el orificio hasta el punto de contacto con la placa era necesario que el diafragma no estuviera completamente fijo, pero si éste no estaba rígido no se

²⁵⁹Según Bohr, el ejemplo Compton constituye un ejemplo ilustrativo de cómo muchas contradicciones aparentes se pueden superar con el análisis de las condiciones experimentales bajo las cuales se manifiestan los aspectos complementarios, como el aspecto corpuscular y el aspecto ondulatorio de los electrones y los fotones. Así, un dispositivo preparado para estudiar el intercambio de energía y de impulso entre el electrón y el fotón comportará una imprecisión en la descripción espacio-temporal de la interacción. Y, recíprocamente, todo intento de localizar exactamente el punto de colisión entre el fotón y el electrón excluye, por la interacción inevitable con los instrumentos de medida (reglas fijas y relojes) la determinación exacta del balance de energía e impulso. N. Bohr, *Ibid.* (p.74). En cambio, Renninger en su experimento de 1953 pretende mostrar en un solo experimento la naturaleza corpuscular y ondulatoria de la luz y la materia y en su experimento de 1960 pretende mostrar que hay medidas sin interacción; por consiguiente, la existencia de estas últimas implicaría la revisión de la consecuencia inferida por Bohr, de la imposibilidad de la determinación exacta de la posición y del momento intercambiado.

podía conocer exactamente la posición del diafragma; y si no se podía conocer con precisión la posición del diafragma tampoco se podría conocer con precisión la posición final de la partícula. Por tanto, la propuesta de Einstein no tuvo éxito.

A continuación, en la discusión del congreso, surgió otro experimento mental: entre el diafragma con el orificio y la placa fotográfica se intercalaría otro diafragma con dos orificios. Entonces en la placa se observarían bandas de interferencia²⁶⁰, que serían debidas a la difracción producida en los dos orificios.



Einstein sugirió entonces que si se conociera la transferencia de impulso de la partícula al primer diafragma se podría saber a través de cuál de los dos orificios habría pasado la partícula, puesto que, por las leyes de conservación, la transferencia de impulso en el primer diafragma sería diferente cuando la partícula hubiera seguido la dirección que le habría llevado al orificio superior o al inferior. Pero, en este nuevo experimento, Bohr volvió a mostrar que la propuesta de Einstein tampoco funcionaba, puesto que la medida del impulso implicaría una indeterminación en el conocimiento de la posición del diafragma, que no había de estar fijo, lo cual implicaría una indeterminación en la posición de las franjas de interferencia, que haría que no se presentaran efectos de interferencia; y, a continuación, Bohr dió su propia interpretación²⁶¹:

²⁶⁰Constituye el experimento de la doble rendija, como también lo constituye el funcionamiento del interferómetro Mach-Zehnder que utiliza Renninger y Elitzur y Vaidman en sus IFMs
²⁶¹ Bohr, *Ibid.*, (p.82)

...nos vemos obligados a escoger entre seguir la trayectoria de la partícula u observar los efectos de interferencia [...]

Tenemos aquí un ejemplo típico de la forma en la que los fenómenos complementarios aparecen bajo condiciones experimentales mutuamente exclusivas, ejemplo que nos sitúa ante la imposibilidad, en el análisis de los efectos cuánticos, de trazar una separación neta entre un comportamiento independiente de los objetos atómicos y su interacción con los instrumentos de medida que sirven para definir en qué condiciones aparecen los fenómenos.

Así pues, la discusión sobre dichos experimentos mentales llevó a los físicos del Congreso Solvay al debate filosófico sobre las consecuencias epistemológicas de los nuevos descubrimientos científicos. Fue entonces cuando Einstein “preguntó irónicamente si podíamos creer que las autoridades providenciales recurrían a tirar los dados (*'ob der liebe Gott würfelt'*)”, si Dios jugaba a los dados, a lo cual Bohr respondió que se había de ser muy cauto al atribuir a la Providencia divina atributos del lenguaje cotidiano, de manera análoga a las numerosas ocasiones en las que Bohr también recordaba que el lenguaje ordinario estaba construido según la visión ordinaria del mundo, que era próxima la concepción clásica de la física y que, obviamente, no tenía en cuenta los fenómenos cuánticos.

Y Ehrenfest, en el momento álgido de la polémica, comparó el enfrentamiento de Einstein y Bohr con el de Einstein y los adversarios de la teoría de la relatividad. Como vemos, Bohr establecía este paralelismo de forma reiterada en sus artículos y en sus conferencias; ello constituía un recurso para acercarse a Einstein, para que intentase comprender la necesidad de aceptar las repercusiones filosóficas de la teoría cuántica. Así pues, de la misma manera que la teoría de la relatividad había impuesto una nueva condición al conocimiento de los fenómenos físicos, la condición de que hay que tener en cuenta el sistema de referencia, así también la teoría cuántica imponía una nueva condición respecto al sistema de referencia: “es imposible establecer una separación neta entre el comportamiento independiente de los objetos y su interacción con los instrumentos de medida que definen el sistema de referencia”²⁶². En teoría cuántica la interacción entre objeto e instrumento de medida no es negligible, porque la energía intercambiada es grande en relación a la energía total del objeto. En cambio, en la experiencia cotidiana –y en la que estudia la mecánica clásica– dicha interacción es determinable, es decir, se la puede medir, o, si no es determinable, es negligible,

262 Bohr, *Ibid.*, (p.89)

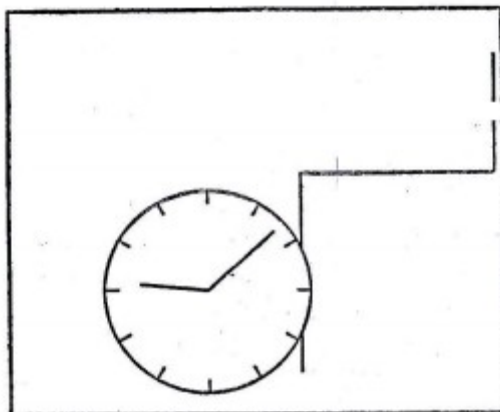
porque la energía total del objeto observado es mucho más grande que la energía transferible.

Posteriormente, en el Congreso Solvay de 1930, la discusión entre Einstein y Bohr adquirió un tono que el mismo Bohr calificó de “dramático”. Bohr manifestó de nuevo su posición: no es posible utilizar el intercambio de impulso y energía entre objeto e instrumento si dicho instrumento sirve para medir la posición en el espacio y el tiempo, respectivamente (por la relación de indeterminación entre impulso y posición y entre energía y tiempo) y Einstein, en esta ocasión, respondió que sí era posible, si se utilizaba la relación de la teoría de la relatividad:

$$E = mc^2$$

puesto que dicha fórmula permitiría medir con una pesada la energía total de un sistema y determinar la energía que se le transferiría en el momento de una interacción con un objeto atómico. Entonces Einstein propuso el siguiente experimento mental:

En una caja había un orificio lateral que se podía abrir y cerrar con un obturador que se movía por medio de un mecanismo de relojería. Si la caja contuviera una cierta cantidad de radiación y el reloj se preparara de manera que en un momento dado abriera el obturador durante un breve intervalo de tiempo, se podría conseguir que sólo un fotón pasara a través del orificio en un momento determinado con tanta precisión como se quisiera. Según Einstein, si se pesara la caja antes y después de este instante, sería posible medir la energía del fotón con exactitud, en contra de las relaciones de indeterminación aplicadas a la medida del tiempo y de la energía en mecánica cuántica.



Bohr consideró este argumento un “serio desafío” y pensó profundamente en la manera de refutarlo. Por ello se concentró en cómo realizar el experimento mental que había sugerido Einstein. Entonces Bohr ideó el siguiente dispositivo: la caja que había pensado Einstein estaba colgada de una balanza de muelle y estaba provista de una aguja que servía para medir la posición sobre una escala fijada en el soporte de la balanza. Así el peso de la caja se podía obtener con cualquier precisión Δm ajustando la balanza a la posición 0. Pero la determinación de esta posición con una precisión Δq implicaría en la medida del impulso de la caja una indeterminación Δp , por la relación de indeterminación

$$\Delta p \cdot \Delta q \approx h$$

Por otra parte, Δp había de ser obviamente inferior al impulso total que durante el tiempo T de la pesada pudiera dar el campo gravitacional a un cuerpo de masa Δm , es decir:

$$\Delta p \approx h/\Delta q \quad \text{y} \quad \Delta p < T \cdot g \cdot \Delta m$$

Pero, según la teoría de la relatividad general, un reloj cuando se desplaza en la dirección de la fuerza gravitacional por una cantidad Δq cambia su ritmo de manera que, en un intervalo de tiempo T , su lectura difiere en una cantidad ΔT determinada por la relación:

$$\Delta T / T = 1/c^2 \cdot g \cdot \Delta q$$

y, con $E = mc^2$, se infiere

$$\Delta T \cdot \Delta E > h$$

que constituye precisamente el principio de indeterminación, por el cual si se midiera exactamente la energía del fotón no se podría determinar el instante exacto en el que éste se escapaba. Einstein siguió proponiendo otras maneras de utilizar el dispositivo de la balanza pero él mismo terminó admitiendo que “los efectos estaban en completa conformidad con las predicciones de la teoría

[cuántica]²⁶³

En 1933, Bohr visitó a Einstein en Princeton y de nuevo ambos científicos trataron de los aspectos epistemológicos de la física atómica; pero, según Bohr, la distancia entre el lenguaje y los puntos de vista que mantenían “obstaculizaron aún la mutua comprensión”. Y esta distancia “llegó al conocimiento del gran público” por medio del célebre artículo que Einstein publicó con Podolsky y Rosen en 1935²⁶⁴. La argumentación de EPR se basaba en el criterio de realidad física que se desprendía del enunciado siguiente: “Si, sin perturbar un sistema físico determinado, podemos predecir con certeza el valor de una cantidad física, hay entonces un elemento de realidad física que corresponde a esta cantidad”²⁶⁵ y acababa con la conclusión de que la mecánica cuántica no proporcionaba una descripción completa de la realidad física.

EPR ejerció una gran influencia en Bohr, que meditó intensamente para introducirse en la mente de sus oponentes y así poderles refutar²⁶⁶. Así en el artículo de respuesta, publicado sólo tres meses después que EPR, reiteraba sus consideraciones respecto al experimento mental que había discutido con Einstein en los congresos Solvay, el del dispositivo compuesto por un diafragma con un orificio, que estaba situado ante otro diafragma con dos orificios y ante una placa fotográfica. Conocer el momento intercambiado por la partícula en el primer diafragma no ayudaría a predecir el orificio del segundo diafragma por el que pasaría la partícula porque, si el primer diafragma estuviera rígidamente unido al soporte, dicho momento intercambiado pasaría directamente al soporte y no podríamos tenerlo en cuenta y, si no lo estuviera –por ejemplo, si estuviera unido a unos muelles que le permitieran moverse libremente–, la indeterminación en el conocimiento de la posición del primer diafragma hemos visto que implicaría la anulación de las bandas de interferencia.

Con esta imagen Bohr ilustraba su contundente respuesta a EPR: el criterio de realidad de EPR “contiene una ambigüedad esencial” ¿Dónde? En la condición que imponen sus autores con los términos “sin alterar el sistema” ¿Por qué? Porque en mecánica clásica es posible que se cumpla

263 Bohr, *Ibid.*, (p.95)

264 A.Einstein, B.Podolsky & N.Rosen, “Can quantum-mechanical description of physical reality to be considered complete?”, *Physical Review*, **47**, 777-80, (1935)

265 El carácter de esta noción de realidad, sorprendente en un principio y sofisticada en cierta medida, puede resultar ilustrativo de la concepción de Einstein según la cual los conceptos físicos son libres creaciones de la mente.

266 Bohr pensó y escribió la respuesta en un estado tal de excitación que le hizo trabajar mucho más rápidamente de lo que en él era habitual, según explica su colaborador Rosenfeld en *Bohr's Reply* (1967)

esta condición, pero no en mecánica cuántica; ello es debido a la existencia del cuanto de acción h – que según Bohr atribuye una “individualidad básica a todo proceso atómico”²⁶⁷ – en la interacción entre objeto e instrumento–; h hace que dicha interacción nunca pueda ser nula sino que es siempre, como dice Bohr, “finita e incontrolable”. Así pues, “el procedimiento de medida tiene una influencia esencial en las condiciones en las que se basa la definición de las cantidades físicas”²⁶⁸. Por tanto, había que renunciar al criterio de realidad que proponían EPR.

La solución que ofrecía Bohr al problema que planteaba EPR era de nuevo el punto de vista de la complementariedad, “según el cual la descripción mecanocuántica de los fenómenos físicos satisfaría, dentro de su dominio de aplicación, todos los requisitos racionales de completud”²⁶⁹. Así pues, la localización espacial y la aplicación del teorema de conservación del momento, como la medida del tiempo y la de la energía, eran, respectivamente, dos aspectos de la descripción física que se manifestaban en dos dispositivos experimentales diferentes, es decir, eran complementarios.

Bohr terminaba su artículo destacando una vez más el paralelismo entre la teoría de la relatividad general y la teoría cuántica: de la misma manera que aquella había mostrado la necesidad de modificar las ideas sobre el carácter absoluto de los fenómenos físicos, la noción de complementariedad de la teoría cuántica implicaba necesariamente una revisión de nuestra noción de realidad física. Y, en nota a pie de página, Bohr aseguraba que había compatibilidad entre ambas teorías y, en un futuro, trataría dicho tema con más detalle, “con todos los desarrollos matemáticos y diagramas de dispositivos experimentales necesarios, que no he podido incluir en este artículo, que subraya sobretodo el aspecto dialéctico de estas cuestiones.”

El pensamiento dialéctico de Bohr según Einstein no resultaba propio de un científico. Así, la refutación de Bohr a EPR aumentó la distancia que ya existía entre la actitud filosófica de Bohr y la de Einstein. El debate sobre la completud de la teoría cuántica fue el último enfrentamiento entre Bohr y Einstein. Después, cada uno de ellos quedó confinado en su posición. Así, Einstein comentó respecto a la posición de Bohr que era lógicamente posible, pero “tan contraria a mi instinto científico que no puedo dar por terminada mi búsqueda de una concepción más completa”²⁷⁰

267N.Bohr, “La teoría atómica y la descripción de la naturaleza”, *Ibid.* (p. 99)

268 N.Bohr “Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?”, (1935), “*Collected Works*, VII (p.292-298)

269 N.Bohr en el Abstract de *Ibid.*

270L. Rosenfeld , *Bohr's Reply*, (1967)

8.2 CONFLICTO DE “THEMATA”

Bohr y Einstein representan dos actitudes antitéticas, dos posiciones enfrentadas, que defienden unas nociones que se pueden incluir en la categoría de los *themata* de Holton²⁷¹; con este término dicho autor se refiere a conceptos, proposiciones e hipótesis generales que guían a científicos y dividen la comunidad intelectual, porque los científicos las defienden con obstinada y apasionada lealtad; los *themata* se expresan en díadas antitéticas como continuidad/discontinuidad y determinismo/probabilismo, son interdisciplinarios, pues son compartidos por diversas ciencias – hemos visto cómo Bohr aplicaba conceptos de la física a la psicología y a la biología– y se encuentran a lo largo de toda la historia, pues, en su esencia, se repiten a través del tiempo, aunque con formulaciones adaptadas a la época y al contexto concretos. Por otra parte, los *themata* no se refieren a un determinado contenido empírico ni analítico, sino que son presuposiciones generales respecto al mundo, que ayudan a entenderlo en su totalidad; por ello no pueden comprobarse ni *a priori* ni *a posteriori*, es decir, no pueden demostrarse lógicamente, ni verificarse o refutarse experimentalmente. Por esta última razón y, además, por la convicción con la que los científicos se adhieren a la posición escogida y por la pasión que ponen en su defensa es muy difícil llegar a un consenso. Entre tales opuestos temáticos no hay forma de llegar a un acuerdo. Por esta razón, el conflicto entre estas posiciones nunca se resuelve, surge de nuevo en diferentes épocas y perdura a través de la historia.

Así, Einstein y Bohr constituyen un claro ejemplo del hecho que observó Holton en diferentes situaciones del desarrollo científico: teniendo ámbos acceso prácticamente a la misma información científica, llegaron a mantener modelos de explicación radicalmente opuestos, que habían surgido de preconcepciones filosóficas diferentes. Einstein representa el modelo de explicación de la física clásica, pues conservaba los presupuestos filosóficos del físico del siglo anterior, puesto que defendía la relación de causalidad y la distinción sujeto-objeto, negaba el probabilismo, no aceptaba la contradicción y buscaba la simplicidad. En cambio, Bohr representa un paradigma completamente diferente, relacionado con las nuevas corrientes de ideología vitalista y antirracionalista que se habían desarrollado en Europa a principios del siglo XX, puesto que Bohr sustituía la relación de causalidad por la de complementariedad, veía el sujeto y el objeto como una unidad, aceptaba el azar y huía de la simplicidad.

271 G.Holton, *Ensayos sobre el pensamiento científico en la época de Einstein*, Alianza Universidad, Madrid, (1982), capítulos 1 y 3

Por otra parte, encontramos, en los documentos de la época, elementos que muestran la carga emocional y la obstinación que tuvo el debate Bohr-Einstein y que dificultó el acuerdo entre sus protagonistas y seguidores. Por ejemplo, Heisenberg, que intentó convencer a Einstein, explicaba:

Pasé una tarde muy agradable con Einstein, pero cuando llegamos a la interpretación de la mecánica cuántica yo no pude convencerle a él y él no me pudo convencer a mí. Siempre decía, "bueno, estoy de acuerdo en que cualquier experimento cuyos resultados puedan ser calculados por medio de la mecánica cuántica resultará tal como dices, pero aun así este esquema no puede constituir una descripción definitiva de la naturaleza".

[...]dudo que la repugnancia de Einstein, Planck, von Laue y Schrödinger para aceptarlas [las descripciones cuánticas como básicas] deba ser considerada simplemente como prejuicios.²⁷²

Hemos visto anteriormente que Einstein aludía a su "instinto científico" para justificar su oposición a la postura de Bohr y, en una famosa carta dirigida a Born, Einstein escribía: "La mecánica cuántica es ciertamente impresionante. Pero una voz interior me dice que no constituye aun la última palabra".

Finalmente, observamos, en la misma línea, que los estilos con que se expresan Bohr y Einstein también son totalmente diferentes: Bohr pretende exponer múltiples aspectos de la idea que considera, aunque sean antitéticos. Es más, parece que disfrute mostrando contradicciones. Para mostrar aspectos diferentes emplea largas y complicadas frases, llenas de expresiones ambiguas. En cambio, Einstein busca la simplicidad lógica en todos los sentidos, la sencillez matemática, la unidad, la cohesión y la transparencia en la exposición, aunque para ello tenga que dejar al margen múltiples aspectos de la idea que considera.

En conclusión, el debate entre Einstein y Bohr, dos científicos preocupados por las mismas cuestiones, las consecuencias epistemológicas de la teoría cuántica, simboliza el eterno diálogo que en la historia se ha dado sobre las luces y las sombras, los éxitos y las frustraciones de la mente humana en su lucha por la conquista del conocimiento.

272Holton, *Ibid.* (p. 72)

9. ELEMENTOS KANTIANOS EN EL PENSAMIENTO DE BOHR

Hay reminiscencias kantianas en el pensamiento de Bohr²⁷³, que provienen de Høffding, quien, según Murdoch²⁷⁴, simpatizaba con el neokantismo. Así, el sentido que Bohr otorgaba al término “fenómeno” recuerda la distinción que establecía Kant entre el *noumenon* o cosa en sí y el *phenomenon* o cosa tal como aparece. Y tanto Kant como Bohr mantenían que el objeto se puede conocer sólo en cuanto aparece, es decir, sólo en cuanto es fenómeno.

Pero Bohr no siempre utilizó el término “fenómeno” de la misma manera. A partir de su réplica a EPR cambió el uso que dió a dicha palabra. Antes de EPR, Bohr se expresaba a menudo así²⁷⁵: ...”la magnitud finita del *quantum* de acción impide establecer una aguda distinción entre un fenómeno y el instrumento con el que es observado, una distinción que subyace al habitual concepto de observación”. Y en Como, en 1927, Bohr hablaba de “alterar el *fenómeno*”, donde “fenómeno” significaba lo que Folse²⁷⁶ llama “objeto fenomenal”, es decir, el objeto cuyas propiedades son determinadas por la observación. Así, entonces, para Bohr, el “fenómeno” era el objeto que interactuaba con los instrumentos de observación para producir la observación; porque Bohr suponía que dicho objeto observado tenía unas propiedades, pero la interacción con el instrumento de observación las alteraba de tal manera que su conocimiento era imposible.

Pero, en su réplica a EPR, Bohr enfatizó el valor de la interacción y mostró que la ambigüedad de no distinguir entre el sistema como objeto fenomenal observado y el sistema como realidad independiente invalidaba el argumento de EPR. Por esta razón, a partir de aquel artículo²⁷⁷, Bohr evitó dicha ambigüedad y alteró su uso de la palabra “fenómeno” para referirse a toda la interacción observacional. Entonces, para Bohr, “fenómeno” significó un conjunto de “observaciones obtenidas en condiciones perfectamente definidas, cuya descripción incluía la de todo el dispositivo experimental”²⁷⁸. Por consiguiente, términos clásicos como “posición ” y “momento” no tuvieron ningún significado fuera del contexto de su aplicación para describir determinadas condiciones

273 Algunos comentaristas, como Hooker, han acentuado dichas reminiscencias y Honner ha llegado a calificar la filosofía bohriana como “trascendental” porque considera que Bohr está interesado principalmente por las condiciones necesarias de la posibilidad del conocimiento objetivo, según Murdoch (en *Ibid.*, p.229-231), quien opina que dicho calificativo lleva a ignorar otros aspectos importantes de la filosofía de Bohr.

274 Murdoch, *Ibid.*, (p.229)

275 Carta de Bohr a Michelson, de 1924, citada por Folse, *Ibid.*, (p.157)

276 Folse, *Ibid.*, (p156)

277 Podemos decir que la noción de fenómeno que encontramos en Bohr es propiamente kantiana hasta su respuesta a EPR.

278 Bohr, “La unidad del conocimiento”, *Ibid.*, (p.90)

observacionales. Así, Bohr, después de advertir que hay que ser cautos con la terminología, decía²⁷⁹:

Hablar, como se hace a menudo, de alterar el fenómeno por la observación, o incluso de crear atributos físicos en los objetos por los procesos de medida, es una fuente de confusión, ya que tales enunciados implican una desviación de las convenciones básicas del lenguaje que, aunque a veces puede ser práctico por la brevedad, nunca puede ser inambiguo. Es ciertamente más acorde con la estructura e interpretación del simbolismo mecánicuántico, así como con los principios epistemológicos elementales, reservar la palabra “fenómeno” para la comprensión de los efectos observados bajo dadas condiciones experimentales

Por esta razón, a partir de su réplica a EPR, Bohr ya no habló de la complementariedad de diferentes aspectos, sino de la complementariedad de diferentes fenómenos, como ocurre con el fenómeno de onda y el de partícula.

Mas, ¿qué otras analogías se pueden encontrar entre el pensamiento de Kant y el de Bohr? Kant en su “Crítica de la Razón Pura” mantenía que los conceptos tienen significado solamente si se podían aplicar a objetos que se podían percibir a través de los sentidos, es decir, sólo si se podían aplicar a fenómenos. Por consiguiente, si un concepto no se puede aplicar a ningún fenómeno “no tiene ningún significado y está totalmente carente de contenido”, puesto que “todos los conceptos...se relacionan con intuiciones empíricas, es decir, con los datos de una posible experiencia. Aparte de esta relación, no tienen validez objetiva”²⁸⁰. Cuando Kant escribía que “pensamientos sin contenido son vacíos, intuiciones sin conceptos son ciegos”²⁸¹ quería decir que conceptos y experiencia iban unidos, que cualquiera de estos dos elementos no podía existir sin el otro, porque, para Kant, la función de los conceptos era organizar nuestras numerosas y desordenadas percepciones. De la misma manera, para Bohr, conceptos físicos como “posición exacta” y “momento exacto” sólo eran aplicables en tanto que se referían a observables. Así, por ejemplo, en condiciones en las que la posición de una partícula era observable, su momento no lo era; entonces el término “momento” de dicha partícula no tenía significado.

Así pues, el lenguaje de Bohr²⁸² recuerda a menudo el de Kant. La expresión “fallo de las formas de

279 En una entrevista con O.Klein en 1963, según cita Folse en *Ibid.*, (p.157)

280 Kant, *Crítica de la razón pura*, trad. P.Ribas, Madrid, 2012, p.261 (A 239)

281 Kant, *Ibid.* (p.93), (A51)

282Especialmente el del Bohr anterior a su respuesta a EPR.

percepción adaptadas a nuestras impresiones sensoriales ordinarias”²⁸³ proviene de la expresión *Anschauungsformen*, formas de percepción, de Kant. Para Kant las formas de percepción eran espacio y tiempo; Bohr les añadió la causalidad, porque pensaba que “la causalidad puede considerarse como un modo de percepción por el cual reducimos nuestras impresiones sensoriales a un orden”²⁸⁴. El uso que hacía Bohr de la expresión “formas de percepción” provenía de Høffding, quien había agregado también la continuidad, al espacio, al tiempo y a la causalidad.

Para Bohr, espacio, tiempo y causalidad eran formas de percepción porque todo lo que percibimos a través de los sentidos aparece en relaciones espacio-temporales y causales con los otros objetos de percepción. Así, mediante nuestras formas de percepción organizamos nuestra experiencia sensorial ordinaria y determinamos el marco conceptual de la física clásica. Si estas formas fallan en el mundo de la microfísica no es porque sus objetos no sean directamente perceptibles por nuestros sentidos sino porque en dicho mundo no se puede presuponer la continuidad. Y la descripción espacio-temporal causal postula la continuidad. Además, para Bohr “la definición de cada palabra esencialmente presupone la continuidad de los fenómenos y se hace ambigua cuando esta presuposición no se aplica”²⁸⁵ puesto que, según Bohr, el lenguaje cotidiano está construido con la finalidad de organizar nuestra experiencia sensorial. Así, para Bohr, las formas de percepción eran las condiciones de la posibilidad de nuestra experiencia sensorial y de los significados de los términos que usamos para describirla. Es evidente la raíz kantiana de esta concepción bohriana.

Nuestras formas de percepción fracasan en el mundo microfísico porque en dicho dominio también falla otro de los supuestos propios de la concepción ordinaria de observación, el de la distinción clara entre objeto observado y sujeto observador (incluyendo todo instrumento de observación). Habitualmente entendemos la observación como la recepción pasiva de la información que proviene del exterior y suponemos que dicha información no es perturbada por el proceso de observación. Pero en el mundo microfísico la existencia del cuanto de acción hace que el instrumento que utiliza el sujeto perturbe el objeto y, por consiguiente, que no se pueda distinguir exactamente qué es sujeto observador y qué es objeto observado. Por esta razón, Bohr consideraba que la distinción sujeto-objeto, propia de la concepción clásica, era una idealización que no se sostenía en física atómica, donde los términos “sujeto”, “objeto” y “observación” perdían su

283 Bohr, “La teoría atómica y la descripción de la naturaleza”, *Ibid.*

284 Bohr, “La teoría atómica y la descripción de la naturaleza”, *Ibid.*

285 Carta de Bohr a Schrödinger del 2 de diciembre de 1926. *Coll. Work*, vol. VI (p.462)

significado habitual. Así, Bohr escribía²⁸⁶:

...existe una estrecha conexión entre el fallo de nuestras formas de percepción, que se encuentra en la imposibilidad de una estricta separación de los fenómenos y los medios de observación y los límites generales de la capacidad del hombre para crear conceptos, que tienen sus raíces en nuestra distinción entre sujeto y objeto

Es decir, en el límite en el que se borra la diferencia sujeto-objeto no sólo fracasan nuestras formas de percepción sino también nuestro esquema conceptual. La distinción sujeto-objeto es la frontera de nuestra capacidad para formar conceptos que permitan entender los objetos que percibimos. Si no se puede distinguir el sujeto observador y el objeto observado, no es posible que el sujeto conciba el concepto al que pertenece el objeto.

10. LA CONCEPCIÓN ONTOLÓGICA DE BOHR

No es fácil caracterizar la concepción ontológica de Bohr. Nunca se pronunció al respecto²⁸⁷ y no creía²⁸⁸ que la mecánica cuántica tuviera implicaciones realistas ni antirealistas. A menudo se le ha considerado antirealista. Pero al leer sus escritos no se ven razones suficientes para otorgarle claramente este calificativo, puesto que se encuentran tanto elementos realistas como elementos antirealistas²⁸⁹. Por esta razón, cabe pensar que al atribuirle la etiqueta de antirealista más bien han influido factores externos a su pensamiento; quizás ha sido por su estrecha relación con Heisenberg, quien mostró claramente su positivismo²⁹⁰ y quizás también por su postura en el debate que mantuvo con Einstein²⁹¹, quien representaba la defensa de los principios realistas de la física clásica²⁹².

286 Bohr, "La teoría atómica y la descripción de la naturaleza", *Ibid.*

287Por esta razón hay notables diferencias entre las conclusiones a que han llegado diferentes autores que han estudiado el pensamiento de Bohr. Así, según Folse y Murdoch, Bohr es esencialmente realista. En cambio, según Feyerabend es positivista y según Jammer tiene aspectos "complementarios" de realismo y de positivismo. M.Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, *Ibid.* (p.203)

288Según Folse, *Ibid.*

289Por eso Murdoch lo considera realista débil.

290Antes de los años 30

291Pero Murdoch piensa que la filosofía de la ciencia de Einstein es mucho más cercana a la de Bohr de lo que ambos pensaban, puesto que Einstein es menos realista de lo que Bohr suponía y Bohr es menos antirealista de lo que Einstein suponía. *Ibid.* (p.199)

292Bohr rechazaba la causalidad, que es una característica fundamental de la concepción realista de Einstein. Así manifestaba: "La mecánica cuántica nos obliga a renunciar a la idea de determinismo" y entendía por descripción determinista la descripción causal. "La unidad del conocimiento", *Ibid.* (p.85)

10.1 ELEMENTOS REALISTAS

Sabemos que Bohr empezó su carrera como científico experimental investigando el comportamiento de los componentes del átomo. A pesar de que en un principio se le había asociado²⁹³ con el fenomenismo de Mach, que era escéptico respecto a la existencia del átomo, Bohr estudió el funcionamiento interno del átomo sin albergar ninguna duda sobre su existencia real. La creencia en la realidad de los átomos estaba, según Bohr, justificada empíricamente:

Sabemos ahora, es cierto, que las dudas expresadas con frecuencia respecto a la realidad de los átomos eran exageradas gracias a que el maravilloso desarrollo del arte de la experimentación nos ha permitido estudiar los efectos de los átomos individuales²⁹⁴

El descubrimiento del electrón y del núcleo atómico como constituyentes del átomo reforzó la creencia en la realidad de los átomos por parte de Bohr, que se concentró en la tarea de describirlos. Cuando adoptó el postulado cuántico escribió: “Quizás he descubierto un poco sobre la estructura del átomo [...] que quizás es [...] un poco de la *realidad*”²⁹⁵.

No sólo durante la primera etapa de su carrera, en la que Bohr se dedicó principalmente al estudio de la estructura interna del átomo, sino durante toda su vida manifestó reiteradamante que el objetivo de la teoría atómica era comprender las propiedades de la materia, especialmente las propiedades de los diferentes elementos químicos por sus diferentes estructuras atómicas²⁹⁶; así en 1929 mostraba su interpretación realista del atomismo con las siguientes palabras:

Los fenómenos naturales, tal y como se experimentan por medio de nuestros sentidos, parecen ser muy variables e inestables. Para explicarlos, se ha supuesto, desde la antigüedad, que los fenómenos eran el resultado de la acción combinada y de la interacción de gran número de partículas diminutas llamadas “átomos”, por sí mismas inalterables y estables, pero que, debido a su pequeñez, escapan a la percepción inmediata. Dejando a un lado el problema fundamental de si está justificado exigir representaciones intuitivas en dominios que caen fuera del alcance de nuestros sentidos, la teoría atómica fue desde el principio una necesidad de carácter hipotético. Y

293Según Folse, *Ibid.* (p.225)

294N.Bohr, “El cuanto de acción y la descripción de la naturaleza”, en *La teoría atómica y la descripción de la Naturaleza*, *Ibid.* (p.134)

295Carta de Niels Bohr a Harald Bohr, 19 de junio de 1912, según Folse, *Ibid.*(p.225)

296Según las notas de Bohr para unas conferencias que ofreció en 1923. Folse, *Ibid.* (p.225)

puesto que se creía que nunca sería posible tener una evidencia directa del mundo de los átomos por la naturaleza misma de la cuestión, no quedaba más remedio que asumir que la teoría atómica conservaría siempre este carácter. Sin embargo, [...] el extraordinario desarrollo de los métodos de la física experimental nos ha hecho conocer un gran número de fenómenos que nos informan de modo directo de los movimientos de los átomos [...]. Pero al mismo tiempo que se disipaban todas las dudas relativas a la realidad de los átomos y que adquiríamos incluso un conocimiento detallado de su estructura interna, nos enfrentábamos a interesantes problemas que nos recordaban la limitación natural de nuestras formas de intuición²⁹⁷

Vemos, pues, que el problema para Bohr no era la “realidad” de los sistemas atómicos, mostrada por la evidencia empírica, sino su adecuada descripción. No dudaba de su existencia, pero sí dudaba de cómo habían de ser los modelos que permitieran describirlos. Bohr, aunque convencido de la realidad de los átomos, estaba también convencido de que no se los podía comprender con modelos intuitivos, puesto que éstos están limitados al dominio de lo visible, que es estudiado por la física clásica, basada en supuestos que no son válidos en el dominio atómico.

En la física clásica generalmente se supone que es despreciable la interacción entre el instrumento de medida y el objeto, pero en física atómica no puede aceptarse este supuesto, debido al postulado cuántico y a las dimensiones del objeto. Mas la noción de complementariedad, según Bohr, contempla esta interacción y permite dar una representación objetiva del objeto. Así, dependiendo de las condiciones de observación, es decir, de la interacción, aparecen diferentes fenómenos complementarios –es decir, necesarios y excluyentes– que ofrecen una información completa del objeto.

Mas a la noción de complementariedad de Bohr se le puede atribuir²⁹⁸ un fundamento realista, porque dicha relación implica suponer la existencia de un objeto como base de los fenómenos complementarios. Los fenómenos²⁹⁹ complementarios aparecen porque la observación con diferentes tipos de instrumentos provoca diferentes interacciones. El objeto, al interactuar con

297N.Bohr, “La teoría atómica y los principios fundamentales de la descripción de la naturaleza”, en *La teoría atómica y la descripción de la Naturaleza*, *Ibid.* (p.142)

298Según Folse, *Ibid.* (p. 248)

299Se puede apreciar una diferencia entre la interpretación de la noción de “fenómeno” entre el Bohr anterior a EPR y el Bohr posterior a EPR, puesto que para el primero el “fenómeno” significaba el objeto cuyas propiedades eran determinadas por la observación, la cual comportaba interacción entre el objeto y el instrumento y, en cambio, para el segundo, el “fenómeno” significaba la observación en conjunto, que constituía un sistema, una unidad indivisible entre el objeto y el instrumento.

diferentes instrumentos de observación, provoca fenómenos complementarios. Así, diferentes fenómenos ofrecen información complementaria del mismo objeto. Pero, según Bohr, “es difícil dar un significado a la cuestión de qué hay tras el fenómeno”³⁰⁰. Para ilustrar cómo Bohr veía dicha cuestión en el marco conceptual de la complementariedad, Folse³⁰¹ presenta una analogía del dominio de la psicología. Imaginemos que nuestro propósito es la descripción objetiva de un objeto, que es la personalidad del Sr. Smith. Observamos que éste interacciona con su esposa, con su hijo y con su jefe y se comporta de forma muy diferente con cada uno de ellos, puesto que vemos que el Sr. Smith es afectuoso con su esposa, autoritario con su hijo y sumiso con su jefe. Si sencillamente se pensara que dichos términos descriptivos se refieren a propiedades poseídas por un solo objeto, la personalidad del Sr. Smith, la descripción resultante atribuiría propiedades contradictorias al Sr. Smith. Por esta razón, no las consideramos propiedades del Sr. Smith real, independientes de sus interacciones con otros objetos, sino que pensamos que corresponden a tres descripciones complementarias. Dichas descripciones muestran tres fenómenos, que se refieren a un solo objeto.

10.2 ELEMENTOS ANTIREALISTAS

En la obra de Bohr también encontramos elementos antirealistas. Y aunque no le vemos mantener una perspectiva positivista tan clara como la que mantienen otros creadores de la interpretación de Copenhague³⁰²; sí le encontramos esporádicamente³⁰² manifestaciones de cercanas a las posiciones positivistas, como las siguientes:

...la ciencia tiene por misión extender y ordenar el ámbito de nuestro conocimiento experimental³⁰³.

Y también:

Nos encontramos aquí [es decir, en la física cuántica], bajo un nuevo aspecto, esa antigua verdad que dice que en nuestra descripción de la naturaleza el propósito no es revelar la esencia de los fenómenos sino establecer sólo, y en la medida de lo posible, relaciones entre los múltiples aspectos de nuestra experiencia³⁰⁴.

300Lo escribió Bohr, en 1953, en una carta dirigida a Born, según cita Folse, *Ibid.* (p.248)

301Folse, *Ibid.* (p. 249)

302Como Jordan, quien declaraba que la función de la mecánica cuántica no es “ir más allá de la experiencia y entender la 'esencia' de las cosas”. Jammer en *The Philosophy of Quantum Mechanics*, *Ibid.* (p.202)

303Así Bohr empieza la introducción de *La teoría atómica y la descripción de la Naturaleza*, *Ibid.* (p. 52)

304N.Bohr, introducción de *La teoría atómica y la descripción de la Naturaleza*, *Ibid.*(p.66)

Asimismo explica A.Petersen que cuando se le preguntó a Bohr si el algoritmo de la mecánica cuántica podía considerarse como una representación o un reflejo de un mundo cuántico subyacente éste respondió:

No hay mundo cuántico. Hay sólo una descripción física cuántica abstracta. Es un error pensar que la tarea de la física es descubrir cómo es la naturaleza. La física se ocupa de lo que podemos decir sobre la naturaleza³⁰⁵.

Este fragmento de carácter antirealista contrasta con otra manifestación de Bohr en que también se refería a que la función de la física es hablar sobre la naturaleza, pues la física forma parte de “nuestra tarea”, que consiste en “comunicar experiencia e ideas a otros”, puesto que “estamos suspendidos en el lenguaje”³⁰⁶; es decir, el objetivo de la física es dar una explicación de la naturaleza intrínseca de las cosas para hacer posible una comunicación inambigua de la experiencia. Pero aquí Bohr muestra una actitud muy diferente respecto a la de la cita anterior, puesto que dice:

La lección de la física atómica ha sido que no estamos simplemente coordinando experiencia [...] sino que hemos aprendido que nuestra tarea es desarrollar conceptos humanos para encontrar una manera de hablar que sea adecuada para poner orden en las nuevas experiencias y, por así decirlo, ser capaz de plantear preguntas a la naturaleza de manera que obtengamos ayuda con su respuesta³⁰⁷.

En este fragmento Bohr sugiere que el físico ha de contemplar la naturaleza, interrogarla a través de sus experimentos y confiar que ésta le responda a través de los resultados de dichos experimentos. Así, adaptándose a las respuestas que la naturaleza le ofrece, el físico ha de construir sus modelos para hablar de manera adecuada de ella. Es decir, aquí Bohr está insinuando que el físico puede descubrir cómo es la naturaleza.

Donde Bohr aparece con más rasgos antirealistas es en el debate Bohr-Einstein. Así, Einstein le veía³⁰⁸ como un instrumentalista, puesto que el pensamiento de Bohr también contiene una dosis de instrumentalismo³⁰⁹, entendiendo por instrumentalismo la concepción según la cual los términos teóricos son recursos que sirven para investigar y predecir fenómenos y no representan fenómenos,

305A.Petersen, “The Philosophy of Niels Bohr”, *Bulletin of the Atomic Scientist* **19**, 8-14 (1963) (p.12)

306A. Petersen, “The Philosophy of Niels Bohr”, *Bulletin of the Atomic Scientist* **19**, 8-14 (1963) (p.10)

307Sexta Conferencia Compton, 26 Nov. 1957. Folse, *Ibid.* (p.236)

308Según Folse, *Ibid.* (p.228)

309Según Murdoch, *Ibid.* (p.214)

de la misma manera que un instrumento que utilizamos para construir algo no representa lo que construimos. Así pues, por este componente instrumentalista encontramos a Bohr manifestando reiteradamente que la teoría científica es un instrumento que permite construir descripciones cada vez más ordenadas de los fenómenos.

Además, por otra parte, según Bohr, las propiedades que predicen los enunciados experimentales son cuantitativas porque la estructura de la realidad se puede describir matemáticamente; pero dicha descripción no se puede realizar mediante una única teoría matemática sino que puede realizarse con diferentes teorías, puesto que una teoría matemática es una construcción ideal de la razón, constituida por objetos abstractos, cuyo valor es instrumental, es decir, es una herramienta útil para entender nuestra experiencia del mundo. Así, Bohr manifestaba que la mecánica cuántica se basa “esencialmente en el antiguo artificio matemático de la introducción de cantidades imaginarias”³¹⁰. Esta actitud instrumentalista de Bohr se relaciona con el escaso interés que éste mostraba por el formalismo matemático de las teorías físicas. Su principal interés era la interpretación de dicho formalismo, es decir, el significado físico de las nociones teóricas, que era lo que contribuía a que una teoría consiguiera su objetivo que, para Bohr, consistía en ayudar a comprender, a dar sentido a nuestra experiencia.

Así se explica también que Bohr mantuviera una actitud claramente instrumentalista ante la noción de vector de onda, puesto que lo consideraba un símbolo formal abstracto que constituía simplemente un recurso matemático para generar las funciones de probabilidades adecuadas a los resultados de las observaciones cuánticas.

Mas bajo este componente instrumentalista subyace³¹¹ en el pensamiento de Bohr una base pragmatista. Esta base, que provenía de Høffding –cuya filosofía hemos visto que presentaba elementos en común con el pragmatismo de James– explica por qué Bohr a veces muestra rasgos cercanos al positivismo que han hecho que se le considerara positivista. Ello es debido al hecho de que positivistas y pragmatistas tienen³¹² mucho en común. Así, comparten su rechazo de la metafísica especulativa y consideran que no tienen significado las preguntas que no admiten una respuesta a través de la experiencia empírica o del razonamiento lógico. Pero hay una diferencia significativa entre ellos: para los positivistas, lo que podamos saber depende de lo que podamos

³¹⁰Bohr, “Causality and Complementarity”, *Phil. Sci.* **4**, 1937 (p.292)

³¹¹Según Murdoch, *Ibid.* (p. 231)

³¹²Según Murdoch, *Ibid.* (p.232)

observar y, en cambio, para los pragmatistas, lo que podamos saber depende de lo que podamos hacer –en lo cual se incluye también lo que podamos observar. Así, los pragmatistas insisten en que el valor de un enunciado reside en las futuras consecuencias que conlleva el hecho de aceptarlo.

El fondo pragmatista³¹³ de Bohr explica muchos detalles de su interpretación de la mecánica cuántica. Así, explica que, por una parte, viera los electrones como partículas reales y, por otra parte, considerara inadecuado el modelo de partícula del electrón, puesto que no explicaba toda la información que proporcionan los datos experimentales. Simplemente, el modelo de partícula no funcionaba siempre. Y cuando no funcionaba Bohr entonces utilizaba el modelo de onda del electrón sin otorgarle ningún significado realista. A una persona de mentalidad realista le cuesta aceptar este uso de los dos modelos, que le resulta muy insatisfactorio, puesto que no le ofrece una concepción inteligible de la naturaleza real del electrón y no le permite visualizarlo; pero un pragmatista puede admitir sin reparos el uso de los dos modelos porque ámbos ofrecen beneficios teóricos.

El pragmatismo de Bohr también explica su concepción semántica de la complementariedad de la posición y el momento, es decir, su tesis de que no se puede decir que una partícula tenga a la vez una posición y un momento exactos. Una persona de mentalidad realista seguramente diría que la partícula tiene tales propiedades pero no es posible medirlas simultáneamente con precisión. En cambio, un pragmatista seguramente pensaría que no hay nada en la noción de objeto material, de cualquier tamaño, que le obligue a tener posición y momento exactos y simultáneos; así pues, un pragmatista considera que la noción de posición y momento exactos y simultáneos funciona bien en ciertos dominios, por ejemplo, en el de los objetos macroscópicos; pero en los dominios donde no funciona ha de ser descartada porque no tiene ninguna utilidad práctica, es decir, no sirve ni para describir experiencias pasadas ni para predecir experiencias futuras.

11. CONCLUSIÓN DEL CAPÍTULO

Bohr fue una persona de carácter reflexivo que, aunque no disponía de una formación filosófica

³¹³Según Stapp, la orientación pragmatista de la interpretación de Copenhague es debida a la concepción pragmatista de la ciencia que se encuentra a lo largo de toda la obra de Bohr. Es básicamente la concepción de James, según la cual un enunciado es verdadero si constituye un recurso útil, si funciona para poner orden en nuestra experiencia. H. P. Stapp, "The Copenhagen Interpretation", *American Journal of Physics*, **40**, 1098 (1972) (p. 1105)

académica³¹⁴, se interesó por las implicaciones filosóficas de los descubrimientos de la ciencia física.

Durante años se dedicó a estudiar, con gran éxito, la constitución interna del átomo. Esta investigación le condujo a la teoría cuántica. Pero esta teoría, que le ayudó a obtener resultados satisfactorios en su trabajo de investigador, le generó graves problemas de coherencia, porque requería principios básicos que eran incompatibles con algunos de los principios fundamentales de la física clásica, como el de continuidad y el de causalidad. Para resolver estos problemas, Bohr meditó a la luz de los descubrimientos científicos que se habían conseguido con la nueva teoría y a la luz de las nociones filosóficas que había adquirido durante su juventud en un contexto humanístico más amplio. Así, Bohr, buscando respuestas a las cuestiones que planteaban los nuevos hallazgos, no sólo se inspiró en el dominio especializado de la física atómica, sino también en el extenso campo de la experiencia humana en general, como la vida cotidiana, el dominio de la filosofía, el de la literatura, el de la psicología, el de la biología,...

Dos de las aportaciones con las que Bohr contribuyó a solventar el conflicto entre la teoría cuántica y las teorías clásicas fueron el principio de correspondencia y la relación de complementariedad. Ambas nociones cumplieron una importante función heurística, puesto que el principio de correspondencia significó una guía especialmente eficaz en la investigación de los espectros y la relación de complementariedad constituyó un recurso mental que permitió afrontar fenómenos empíricos tan problemáticos como la doble naturaleza de la luz.

En la actualidad, la noción de complementariedad representa también un marco conceptual general con el que entender el mundo y el ser humano en sus múltiples y diferentes, incluso contradictorios, facetas. Así pues, este concepto permite integrar aspectos de la realidad tan opuestos como inevitables, puesto que el mismo objeto puede requerir la adopción de diversas perspectivas. De esta manera, hemos visto que el pensamiento de Bohr presenta aspectos complementarios, puesto que muestra elementos realistas, elementos instrumentalistas y elementos pragmatistas. Así, Bohr está convencido de la realidad de los átomos, realidad externa e independiente del sujeto cognoscente;

314A menudo Bohr reconocía las condiciones de preparación en las que se encontraba al abordar cuestiones filosóficas. Por ejemplo, inició una conferencia sobre la unidad del conocimiento diciendo que antes de responder a la pregunta de "hasta qué punto cabe hablar de unidad del conocimiento" "había de analizar el significado del término 'conocimiento', a pesar de que no fuera su intención "entrar en una disertación filosófica y académica, para la cual apenas dispongo de la formación necesaria". N.Bohr, "La unidad del conocimiento", *Ibid.* (p. 83)

pero no cree que las teorías puedan descubrir cómo es el mundo y piensa que las construcciones teóricas de la ciencia son simples recursos para ordenar y predecir fenómenos, recursos cuya validez se mide sólo por su funcionalidad práctica. Puede decirse que Bohr acepta un realismo de entidad, pero no de teoría. Cree que el mundo externo existe ³¹⁵ pero no sabe si realmente es como imaginamos.

Hemos visto, pues, que la noción de complementariedad, introducida por Bohr para entender determinados experimentos físicos, trasciende el dominio de la física y se extiende más allá de sus fronteras para contribuir a interpretar de forma unitaria fenómenos de riqueza tan avasalladora como es el pensamiento del propio Bohr.

Finalmente, podemos especular que a la luz de la lección epistemológica que Bohr, a lo largo de su vida, extrajo de los descubrimientos empíricos de la física cuántica, si hubiera conocido los experimentos IFMs de Renninger no le hubieran sido en absoluto ajenas las implicaciones filosóficas que éstos conllevan. Se hubiera interesado por ellas y hubiera reflexionado intensamente sobre ellas.

315H.P.Stapp, *Ibid.* (p.1106)

CAPÍTULO 2. La concepción filosófica de Heisenberg.

ÍNDICE DEL CAPÍTULO

1	Introducción del capítulo.....	140
2	La mecánica de matrices.....	141
2.1	Situación general de la física atómica de la época.....	141
2.2	Los osciladores virtuales.....	143
2.3	El nacimiento de la mecánica de matrices.....	144
3	Las relaciones de indeterminación.....	150
3.1	Circunstancias en las que fueron derivadas las relaciones de indeterminación..	150
3.2	Derivación de las relaciones de indeterminación.....	153
3.3	El problema de la falta de <i>Anschaulichkeit</i>	156
3.4	Respuesta de Bohr.....	157
4	Interpretaciones de las relaciones de indeterminación.....	159
5	El concepto de indeterminación.....	163
5.1	Diferentes significados del término “indeterminación”.....	163
5.2	Precedentes históricos de la noción de indeterminación.....	164
6	La relación de causalidad.....	170
7	El positivismo de Heisenberg.....	173
8	El realismo “práctico” de Heisenberg.....	179
9	Conclusión del capítulo.....	181

1. INTRODUCCIÓN DEL CAPÍTULO

El desarrollo de la moderna mecánica cuántica se inició en el verano de 1925, cuando Heisenberg (1901-1976) concibió la idea de representar las cantidades físicas en conjuntos de números complejos, creando así la mecánica de matrices. A principios de 1927, Heisenberg derivó las relaciones de indeterminación, que constituyen uno de los elementos fundamentales de la interpretación de Copenhague³¹⁶, la interpretación del formalismo matemático de la teoría cuántica que mayor aceptación ganó entre los físicos, a pesar de que, por sus implicaciones filosóficas, cambiaba radicalmente la visión que el hombre tenía de la naturaleza.

Tras estas aportaciones de Heisenberg a la fundamentación de la mecánica cuántica había, sin duda, un fondo conceptual, que nos lleva a preguntar: ¿Qué presuposiciones filosóficas guiaron los trabajos de Heisenberg? ¿En qué clima intelectual fueron concebidos? ¿De qué preconcepciones surgieron? Los pensamientos de Heisenberg no surgieron de la nada, sino que fueron estimulados por los descubrimientos en física atómica, por las dificultades conceptuales que había para encajarlos con las teorías físicas existentes, por las cuestiones metafísicas y epistemológicas que planteaban, por las paradojas que presentaban y por las apasionadas polémicas que provocaban. Encontramos el carácter filosófico del discurso de Heisenberg en repetidas ocasiones, como en la revelación que hizo a M.Bunge³¹⁷: "Mi motivación e inspiración heurísticas han sido siempre de naturaleza filosófica"³¹⁸. Pronunció estas palabras cuando se quejaba de una generación de físicos teóricos que pretendían regresar a Ptolomeo: "Sólo desean describir y predecir los hechos. En cambio, yo soy de mente newtoniana. Quiero entender los hechos". Para entender los hechos que observaba en el laboratorio, Heisenberg desarrolló unos pensamientos que tuvieron gran repercusión en el campo de la física, de la filosofía y del humanismo en general. La mecánica de matrices es uno de los pilares de la mecánica cuántica y las relaciones de indeterminación son una

316El nombre de "interpretación de Copenhague" fue utilizado por primera vez por Heisenberg para denotar el pensamiento filosófico general sobre el significado que los físicos de la escuela de Copenhague, es decir, los que de alguna manera estaban ligados al círculo de Bohr, atribuían a los términos de la teoría cuántica. Una muestra del valor que Heisenberg otorgaba al *Geist*, espíritu, de Copenhague son sus palabras al escribir de él que "ha dirigido todo el desarrollo de la moderna física atómica" en el prefacio de *The Physical Principles of the Quantum Theory*, Dover Publications, Inc. New York (1930)

317D.Cassidy, "Werner Heisenberg: An Overview of His Life and Work", conferencia presentada en el Simposio dedicado a conmemorar el 100 aniversario del nacimiento de Heisenberg y publicada en "100 Years W.Heisenberg's Works and Impact", Ed.D.Papenfus, D.Lüst, W.P.Schleich (2002), Wiley-VCH Verlag GmbH & KgaA. Weinheim. (p. 2)

318Pero hay que señalar que Heisenberg adquirió este carácter filosófico cuando estuvo en la órbita de Bohr; antes de iniciar la época de estrecha colaboración con el físico danés, Heisenberg, cuando se enfrentaba a un problema de física, estaba mucho más interesado en el dominio de las técnicas matemáticas que le permitieran resolverlo que en su comprensión intuitiva.

de las claves de su interpretación. ¿Cómo afectaron a la visión que el ser humano tenía de la Naturaleza? ¿Cómo repercutieron en la concepción de los límites del conocimiento humano?

A responder algunos de los interrogantes que se nos presentan sobre el fondo conceptual y las implicaciones filosóficas de la aportación de Heisenberg a la mecánica cuántica está dedicado este capítulo.

2. LA MECÁNICA DE MATRICES

2.1 SITUACIÓN GENERAL EN LA QUE SE ENCONTRABA LA FÍSICA ATÓMICA DE LA ÉPOCA

A pesar del éxito que había alcanzado con los numerosos problemas de física atómica que había resuelto, la teoría cuántica, antes de 1925, no constituía una teoría lógicamente consistente sino que era un conjunto no sistematizado de hipótesis, principios, teoremas, reglas, analogías y argumentos “ad hoc”. El procedimiento que, en general, se seguía para solucionar un problema era el siguiente: en primer lugar se admitía que las partículas obedecían las leyes de la mecánica clásica y, en segundo lugar, se postulaba que de todas las soluciones obtenidas sólo se había de tener en cuenta las que satisfacían ciertas reglas de cuantificación establecidas “ad hoc”. Así, cada problema era solventado, en un principio, en términos de física clásica y, a continuación, la solución que se había obtenido se adaptaba, según el principio de correspondencia, al lenguaje cuántico³¹⁹. Este proceso de adaptación exigía más intuición y habilidad que sistemática argumentación deductiva. Así se puede decir que a la teoría cuántica de aquella época le faltaban dos de las cualidades esenciales que ha de tener una teoría científica, la autonomía conceptual y la consistencia lógica.³²⁰

Esta era la situación con la que se encontró el joven Heisenberg cuando, en 1924, fue a Copenhague, invitado por Bohr. Llegó en el momento de máximas dificultades para la teoría cuántica. Heisenberg explica así sus impresiones³²¹ de aquella situación:

319 M. Jammer en “The Conceptual Development of Quantum Mechanics”, American Institute of Physics, (p.208) y A. Messiah, “Mecánica cuántica”, Edi. Tecnos, Madrid (1983) (p.31)

320 Esta es la visión general que expone Jammer en *Ibid.* (p.208)

321 Según escribe Heisenberg en la pequeña autobiografía que constituye su “Quantum Theory and Its Interpretation”, ensayo donde describe sus impresiones acerca de la relación de estrecha colaboración que mantuvo con su mentor hasta 1927; a partir de entonces, aunque volvió a Copenhague casi cada año para hablar con Bohr sobre problemas que a ambos preocupaban, “el período de estrecha colaboración que había dado alas al excitante avance científico”,

Así empezó para mí un período infinitamente instructivo de cercana y amistosa colaboración con Niels Bohr. Afortunadamente para mí, este momento coincidió con el período en el que las dificultades en teoría cuántica se hicieron más y más desconcertantes, sus contradicciones internas parecían ser cada vez peores, y nos provocaron una crisis que, a través de una casi dramática serie de descubrimientos en el curso de unos pocos años nos llevó a la solución de los problemas fundamentales.

Como vemos, a pesar de las dificultades, Heisenberg recordaba con satisfacción —escribe “afortunadamente para mí”— aquella época; aunque fue muy dura porque los físicos cuánticos se enfrentaban a problemas conceptualmente muy abstrusos, fue también muy fructífera para él, puesto que le ofreció la oportunidad de contribuir de forma prominente a la formulación de la nueva mecánica cuántica³²² que surgió de aquella profunda crisis. Así, entre 1925 y 1927, Heisenberg publicó 11 artículos científicos originales³²³, la mayoría de los cuales desempeñaron un papel crucial en la creación y el establecimiento de la mecánica cuántica y su interpretación³²⁴; con ellos Heisenberg precipitó la culminación de la revolución cuántica, iniciada con el siglo XX.

Heisenberg, que provenía de Gotinga, donde trabajaba con Born, se benefició³²⁵ de dos tradiciones y estilos científicos, diferentes pero, a la vez, complementarios entre sí. “El énfasis en Gotinga estaba más en el lado matemático, en el lado formal”³²⁶, “mientras que en Copenhague estaba más en el lado, yo diría, filosófico”, decía Heisenberg. Así, para Born el conocimiento de la ciencia física había de ser, ante todo y siempre, una descripción matemática³²⁷. Sin embargo, para Bohr el conocimiento en física había de provenir, en primer lugar, de una comprensión intuitiva, que era resultado de una “intensa ocupación” en los fenómenos físicos estudiados; y sólo posteriormente esta comprensión directa se había de estructurar a través de un “completo análisis racional”, en forma matemática. Así, Heisenberg escribía: “Noté que la claridad matemática no tenía en sí misma valor para Bohr. Temía que la estructura matemática formal oscureciera el núcleo físico del

durante el cual Heisenberg decía que había aprendido infinitamente de Bohr, desgraciadamente terminó. “Bohr Memorial Volume”, North-Holland Publishing Co., Amsterdam (1967)

322Nombre con el que Born bautizó la nueva teoría en 1924 en su artículo titulado “Sobre la mecánica cuántica”, en el que pretendía llevar las leyes clásicas para la perturbación de un sistema mecánico “a una única forma que sugeriría intensamente el paso formal de la mecánica clásica a la ‘mecánica cuántica’”, según palabras del propio autor en la introducción. B.L.van der Waerden, *Sources of Quantum Mechanics*, Dover Publications, New York (2007)

323Según B.L.van der Waerden y Rechenberg. *Gesammelte Werke*, Series A.Springer-Verlag. Berlin (1984)

324Como veremos, las ideas de Heisenberg constituyen un ingrediente fundamental de la interpretación de la teoría cuántica que se impuso, la que fue llamada por el mismo Heisenberg “interpretación de Copenhague” porque sus creadores pertenecían fundamentalmente al círculo de Bohr.

325Según J.M. Sánchez Ron, *Historia de la física cuántica. El período fundacional* (1860-1926). Crítica. Barcelona (2001) (p.425)

326Según cita J.M.Sánchez Ron en *Ibid.* (p.425) de la entrevista que mantuvo Heisenberg con T.Kuhn en 1963

327J.M.Sánchez Ron en *Ibid.*, (p.425)

problema y, en cada caso, estaba convencido de que una completa explicación física había de preceder a la formulación matemática”³²⁸. Ésta podía ser una de las razones por las que Heisenberg pensaba³²⁹ que “Bohr era principalmente un filósofo, no un físico”³³⁰. En cambio, Heisenberg se sentía fascinado por la sencillez y la claridad de la abstracción matemática, que ejercía “una mágica atracción” sobre él y le llevaba a pensar que en el formalismo matemático estaba la clave que permitiría rescatar la teoría cuántica de la crisis en la que estaba sumergida.

2.2 LOS OSCILADORES VIRTUALES

Heisenberg pasó el invierno de 1924-1925 trabajando con N.Bohr y H.Kramers, el más cercano colaborador de éste. Estudió el trabajo que éstos últimos habían realizado con Slater para resolver uno de los misterios de la época, la dualidad onda-partícula. Ellos pretendían explicar el comportamiento de la luz sólo con la interpretación ondulatoria, sin utilizar la hipótesis einsteiniana de los *quantum*. Y fruto de este intento había sido la teoría BKS³³¹.

En la teoría BKS el átomo se consideraba que era un conjunto de osciladores armónicos virtuales, como si fuesen una serie de bolas cargadas que estuviesen unidas por muelles a un punto central. Y la frecuencia y el cuadrado de la amplitud de cada oscilador correspondía a la frecuencia e intensidad —relacionada ésta con la probabilidad de transición de Einstein— emitidas o absorbidas, asociadas con cada posible salto entre dos estados cuánticos. En los estados muy altos, es decir, en el límite de un elevado número cuántico principal n , estos osciladores se correspondían exactamente con los componentes múltiples de Fourier del movimiento orbital, de acuerdo con el principio de correspondencia de Bohr.

Para Bohr estos osciladores virtuales eran los elementos esenciales que constituían la base de su adhesión a la concepción ondulatoria de la luz. A pesar de que ya entonces el efecto Compton parecía apoyar la hipótesis de los *quantum*, Bohr prefería adoptar la interpretación ondulatoria, aunque hubiera de renunciar a dos de los principios más firmemente establecidos de la física clásica: por una parte, la conservación de la energía y el momento y, por otra, la causalidad.

328W.Heisenberg “Quantum Theory and Its Interpretation”, en “Niels Bohr. His life and work as seen by his friends and colleagues”. Edit. Rozental. North-Holland Publishing Co., Amsterdam (1967) (p. 98)

329W.Heisenberg “Quantum Theory and Its Interpretation”, *Ibid.* (p95)

330Y añadía”pero estaba convencido de que la filosofía natural en nuestra época sólo tiene peso si cada uno de sus detalles puede estar sujeto a la inexorable prueba del experimento”

331Ver el apartado 6.1.2 del anterior capítulo sobre Bohr.

Slater había llegado a Copenhague³³² con la idea de un “campo virtual de radiación” o “campo fantasma” que no transportaba energía o momento — y por esta razón se llamaba “virtual”— y era continuamente emitido y absorbido por todos los osciladores virtuales de un átomo. Usando la noción de oscilador virtual y la noción de campo virtual, Bohr, Kramers y Slater construyeron una teoría en la que el salto cuántico, que se percibía como la emisión de una onda de luz realizada por el correspondiente oscilador, podía ser inducido por el campo virtual, aunque no hubiera ninguna transferencia de energía ni de momento. Además, en dicha teoría no se daba ninguna relación de causalidad, puesto que no se presentaba ninguna conexión entre fenómenos considerados causas y fenómenos considerados efectos, ya que la absorción de energía luminosa que experimentaba un átomo no estaba correlacionada con la emisión de energía luminosa experimentada por ningún otro.

La hipótesis BKS fue claramente refutada porque se comprobó empíricamente la conservación de la energía y del momento; pero mostró a Heisenberg que la noción de oscilador virtual era una poderosa herramienta que funcionaba muy bien, acorde al principio de correspondencia.

2.3 EL NACIMIENTO DE LA MECÁNICA DE MATRICES

En setiembre de 1925 Heisenberg publicó un artículo de título modesto, “Sobre una reinterpretación teórico-cuántica de las relaciones cinemáticas y mecánicas”, pero de ambicioso objetivo: “establecer una base para la mecánica cuántica teórica basada exclusivamente en relaciones entre cantidades que en principio sean observables”³³³.

Heisenberg empezó su artículo argumentando que los problemas que presentaba la teoría cuántica justificaban la necesidad de realizar profundas innovaciones en ella. Había varias razones para ello. En primer lugar, las reglas que se usaban en teoría cuántica para calcular magnitudes observables, como la energía del átomo de hidrógeno, contenían relaciones entre cantidades que, en principio, eran inobservables, como la posición y el período de revolución del electrón. En realidad, según Heisenberg, sólo se podía observar las fotografías de Wilson, el resultado del experimento que Heisenberg describía³³⁴ explicando que los rayos β emitidos por elementos radioactivos

332D.Cassidy, *Uncertainty. The life and science of Werner Heisenberg*, W.H. Freeman and Company, New York, (1992), (p. 175)

333Abstract del artículo de W.Heisenberg “Quantum-Theoretical Re-interpretation of Kinematic and Mechanical Relations”, de la edición *Sources of Quantum Mechanics*, *Ibid.* (p.261)

334W.Heisenberg, *The Physical Principles of the Quantum Theory*.Dover Publications (1930) (p 4)

“causaban”³³⁵ la condensación de pequeñas gotas cuando atravesaban vapor de agua supersaturado y estas gotitas dejaban huellas que formaban líneas “irregularmente curvas”³³⁶. En segundo lugar, las reglas que se usaban para calcular magnitudes observables sólo se podían aplicar al átomo de hidrógeno, no a otros átomos con varios electrones. Por tanto, estas reglas, que se derivaban de la mecánica clásica, no habían de aceptarse en la cuántica — con excepción de la condición de frecuencia de Einstein-Bohr, $E_{mn}=hv_n-hv_m$, que siempre funcionaba. Así pues, no podía mantenerse la validez de la mecánica clásica para solventar los problemas de la teoría cuántica. Por estas razones, los físicos teóricos, tanto de la escuela de Gotinga como de Copenhague, estaban buscando una nueva mecánica ³³⁷, que Born ya había llamado “mecánica cuántica”. Heisenberg, en la introducción de su artículo, describía la situación con estas palabras³³⁸:

En esta situación parece sensato abandonar toda esperanza de observar, hasta este momento, cantidades inobservables, tales como la posición y el período del electrón y conceder que el acuerdo parcial de las reglas cuánticas con la experiencia es más o menos fortuito. En su lugar me parece más razonable intentar establecer una mecánica cuántica teórica, análoga a la mecánica clásica, pero en la cual sólo haya relaciones entre cantidades observables.

A través de estas palabras podemos intuir la manera de trabajar de la mayoría de los físicos cuánticos del momento. Como hemos mencionado anteriormente, su metodología consistía básicamente en adaptar las fórmulas clásicas al lenguaje de la teoría cuántica, siguiendo la guía del principio de correspondencia. Así, el procedimiento era diferente en cada problema y se necesitaba grandes dosis de destreza e intuición para “adivinar” la solución. Heisenberg, por el contrario, buscaba el esquema formal de una nueva teoría que, absorbiendo en sus fundamentos el principio de correspondencia, permitiera solucionar los problemas de una manera matemáticamente justificada y rigurosa³³⁹.

La “reinterpretación”³⁴⁰ de Heisenberg comenzaba considerando la radiación emitida por un

335A pesar de que Heisenberg negó la relación de causalidad, como veremos más adelante, no podía dejar de utilizar la noción de causa.

336Y Heisenberg continuaba: “la existencia de las huellas y su continuidad mostraban que los rayos podían aproximadamente considerarse como corrientes de pequeñas partículas moviéndose a grandes velocidades. La masa y la carga de estas partículas podía determinarse a partir de la desviación de los rayos por campos eléctricos y magnéticos” W. Heisenberg, *The Physical Principles of Quantum Theory*, *Ibid.* (p.4)

337van der Waerden, *Ibid.* (p.28)

338W. Heisenberg, *Ibid.* (p.262)

339M. Jammer, *Ibid.* (p.211)

340 van der Waerden, *Ibid.* (p. 29-35) y el artículo de Heisenberg, *Ibid.* (p. 262)

electrón que se mueve. En teoría cuántica no es posible³⁴¹, escribía Heisenberg, asignar al electrón una posición espacial, considerada como función del tiempo, por medio de magnitudes observables. Pero, en cambio, sí es posible observar la intensidad de la radiación que emite el electrón. Y Heisenberg reemplazó las órbitas por una serie ordenada de entidades matemáticas que representaban la radiación. Estas entidades fueron posteriormente identificadas como los elementos de un objeto matemático poco conocido entonces, la matriz.

Se pueden distinguir tres pasos en el proceso que siguió Heisenberg para la creación de la mecánica de matrices³⁴²: En primer lugar, Heisenberg reinterpreto las ecuaciones de la cinemática clásica del espacio y el tiempo como fórmulas no clásicas en mecánica cuántica, utilizando las propiedades observables de la radiación emitida por osciladores virtuales atómicos. En segundo lugar, Heisenberg impuso el criterio positivista de la observabilidad de todas las cantidades como un postulado básico de la teoría. Y, en tercer lugar, sustituyó las órbitas mecánicas por los elementos de la matriz.

Veamos cómo se desarrolló el proceso. Heisenberg pensaba que las dificultades con las que se enfrentaba la teoría cuántica no se debían principalmente al fracaso de la mecánica clásica sino al de la cinemática subyacente a dicha mecánica. Y pensó en desarrollar una nueva cinemática³⁴³. En la búsqueda de esta nueva cinemática, Heisenberg comenzó suponiendo que la ecuación del movimiento de un electrón

$$\ddot{x} + f(x) = 0$$

se podía mantener y sólo había de abandonarse la interpretación cinemática de x como una localización. Pero entonces se planteó la siguiente cuestión: ¿Qué clase de cantidades habían de sustituir x en la anterior ecuación del movimiento del electrón?

341 Considerar la localización de un electrón como no observable es un error, porque “según la mecánica cuántica completamente desarrollada, las tres coordenadas x, y, z de un electrón son observables. No obstante, este error fue extremadamente fructífero, porque estimuló a Heisenberg a buscar otras cantidades directamente observables”, según van der Waerden en *Ibid* (p.33),

342 D.Cassidy, *Ibid*. (p.197)

343 Aunque la idea de que “algo en el átomo había de vibrar con la frecuencia adecuada” era compartida por todos los físicos que sustituyeron el átomo por un conjunto de “osciladores virtuales” (como Bohr, Kramers, Slater y Born), la de introducir una nueva cinemática en lugar de una nueva mecánica fue sólo de Heisenberg, según van der Waerden, *Ibid*. (p.29)

En el tratamiento clásico la función $x(t)$ podía expandirse en una serie de Fourier, porque una función $F(t)$ periódica o cuasiperiódica que evoluciona con el tiempo puede expandirse en una suma infinita de términos armónicos dependientes del tiempo, es decir, puede convertirse en una suma de osciladores armónicos. Cada término de la serie puede designarse con un número entero n (siendo $n = 1, 2, 3, \dots$) y cada término puede expresarse como $A_n e^{i\omega t}$, donde A_n es la amplitud de la oscilación y ω_n es la frecuencia angular. Así, cada término representa un oscilador armónico simple —como una bola unida por un muelle a un punto central— oscilando con amplitud A_n y frecuencia ω_n ³⁴⁴.

Y puesto que cada oscilador representa un salto cuántico de un estado estacionario n a otro estado estacionario $n-\tau$, la frecuencia y la amplitud pueden reescribirse de forma que expresen esta combinación de los dos estados:

$$A(n, n-\tau) e^{i\omega(n, n-\tau)t}$$

siendo n y $n-\tau$ los números cuánticos enteros de, respectivamente, los estados inicial y final de un salto cuántico, siendo $\omega(n, n-\tau)$ la frecuencia de la radiación emitida o absorbida por el oscilador virtual y siendo $A(n, n-\tau)$ la amplitud del oscilador virtual.

Las amplitudes A_n del movimiento clásico se elevaban al cuadrado para obtener la intensidad de la radiación emitida. Lo que Heisenberg buscaba era correspondiente regla de multiplicación para las amplitudes de los osciladores virtuales cuánticos, de las cuales pretendía derivar las intensidades observadas de las líneas espectrales. Así pues, Heisenberg seguía el criterio de observabilidad que en un principio había postulado.

En física clásica del cuadrado del primer armónico ($n = 1$) se deducía el segundo armónico ($n = 2$), según la relación $(a_1 e^{i\omega t})^2 = b_2 e^{2i\omega t}$. Heisenberg se preguntaba: ¿cuál es la correspondiente relación cuántica? Según la teoría atómica de Bohr dicha relación se podía corresponder con dos sucesivos

344 Por esta razón, un movimiento más complicado $F(t)$ puede representarse por una suma infinita de tales osciladores

$$F(t) = A_1 e^{i\omega_1 t} + A_2 e^{i2\omega_2 t} + A_3 e^{i3\omega_3 t} + \dots \quad \text{o} \quad F(t) = \sum_n A_n e^{i n \omega_n t}$$

y Heisenberg expandió el movimiento del oscilador, representado por su posición como una función del tiempo, $x(t)$, en la anterior serie de Fourier. La reinterpretación de Heisenberg se inició al considerar el n -ésimo término de dicha serie de Fourier, $A_n e^{i n \omega_n t}$, como un oscilador virtual.

saltos cuánticos. La frecuencia emitida $\omega(n, n-2)$ era entonces igual a la suma de dos frecuencias individuales, que representaban dos sucesivos saltos hacia abajo, de n a $n-1$ y de $n-1$ a $n-2$:

$$\omega(n, n-2) = \omega(n, n-1) + \omega(n-1, n-2)$$

Y Heisenberg descubrió que la amplitud, de la que se deducía la intensidad observada de la línea espectroscópica de frecuencia ω , cumplía la relación:

$$b_2(n, n-2) = a_1(n, n-1) a_1(n-1, n-2)$$

Así, Heisenberg, al reinterpretar la multiplicación de dos series enteras de Fourier, se basó en el anterior resultado para obtener una regla de multiplicación para todas las amplitudes de Fourier que estaban relacionadas con las intensidades (o probabilidades) de los saltos hacia arriba y hacia abajo a partir de un determinado estado n . Y, ya que pueden implicarse más de dos saltos sucesivos en la transición entre el estado n y el estado $n-\beta$ (siendo β un entero), Heisenberg sumó todos los términos que representaban saltos desde y a todos los estados intermedios $n-\alpha$:

$$C(n, n-\beta) = \sum_{n-\alpha} A(n, n-\alpha) B(n-\alpha, n-\beta)$$

donde A, B y C son números complejos.

Esta regla constituyó el núcleo de la reinterpretación de Heisenberg de la teoría cuántica, de su nueva mecánica cuántica. Aunque Heisenberg no sabía nada de matrices en aquel momento, Born pronto reconoció esta regla como la regla fundamental de la multiplicación de dos matrices, las matrices $A(n, n-\alpha)$ y $B(n-\alpha, n-\beta)$, que había estudiado con su profesor Rosanes, discípulo de Frobenius. Born explicaba ³⁴⁵ así la impresión que le provocó la lectura del trabajo de Heisenberg:

Cuando lo leí[...] estuve fascinado...Heisenberg había cogido la idea de las amplitudes de transición y había desarrollado un cálculo para ellas...

³⁴⁵Según cita van der Waerden en *Ibid.* (p 36)

Estaba profundamente impresionado por las consideraciones de Heisenberg, que significaron un gran paso adelante en el programa que habíamos seguido .

Así, Heisenberg estableció, en general, que para cualquier función $f [x(t)]$ se puede encontrar la correspondiente expresión cuántica, suponiendo que la función pueda expandirse como una serie de potencias. Sin embargo, si consideramos el producto de dos cantidades $x(t)$ $y(t)$, Heisenberg encontró una diferencia entre la teoría clásica y la teoría cuántica. Mientras en la primera $x(t)$ $y(t)$ es siempre igual a $y(t)x(t)$, no ocurre necesariamente así en la segunda.

Abandonar la conmutatividad significó para Heisenberg el precio que se había de pagar por obtener el formalismo matemático adecuado para la descripción de los estados atómicos. Este proceso matemático recuerda un principio epistemológico³⁴⁶ general que, ocho años después, Heisenberg expresó con estas palabras³⁴⁷:

Casi cada progreso en ciencia ha sido pagado con un sacrificio, porque casi cada nuevo logro intelectual ha tenido que abandonar posiciones y concepciones previas. De esta manera, el incremento de conocimiento y de profundización disminuye continuamente la pretensión del científico de “comprender” la naturaleza.

Así, el artículo de Heisenberg de 1925 inició la mecánica de matrices. Y, dos meses más tarde, Born y Jordan, continuando el trabajo de Heisenberg, publicaron un nuevo artículo³⁴⁸ en el que convertían el cálculo de matrices de Heisenberg en una “teoría sistemática de mecánica cuántica”³⁴⁹, que constituyó la primera formulación rigurosa de la mecánica de matrices. En él se reinterpretaba casi cada variable y función —como la posición y el momento— de la mecánica clásica como una matriz cuántica.

En noviembre del mismo año, Born, Jordan y Heisenberg publicaron³⁵⁰ un nuevo artículo, con el que continuaban los dos artículos anteriores, el de Bohr y Jordan y el de Heisenberg. Este artículo fue de

346 M.Jammer, *Ibid.* (p.217)

347W.Heisenberg, “Zur Geschichte der physikalischen Naturerklärung”(1933), *Gesammelte Werke*. Series C.Piper Verlag, Berlin (1985), (p.29)

348M.Born, P. Jordan, “On Quantum Mechanics”, edición de van der Waerden, *Ibid.* (p 277)

349Según escriben los autores al iniciar el abstract de su artículo

350M.Born, P.Jordan, W.Heisenberg, “On Quantum Mechanics II” (16-nov 1925), edición de van der Waerden, *Ibid.* (p.321)

fundamental importancia para la historia de la mecánica cuántica³⁵¹, porque ofrecía una exposición lógicamente consistente de la mecánica de matrices, que constituía la primera exposición completa de los fundamentos de la mecánica cuántica. Era un sistema matemático de gran simplicidad, construido lo más paralelamente posible, según escribía Heisenberg ³⁵², a la teoría clásica, de tal manera que podía considerarse como una formulación del principio de correspondencia de Bohr. Permitía hacer cálculos sobre cualquier sistema periódico, como el átomo, de manera análoga a como se hacía en mecánica clásica. E inmediatamente Pauli y Dirac la utilizaron para derivar la serie de Balmer del átomo de hidrógeno.

3. LAS RELACIONES DE INDETERMINACIÓN

3.1 CIRCUNSTANCIAS EN LAS QUE FUERON DERIVADAS LAS RELACIONES DE INDETERMINACIÓN

Las relaciones ³⁵³ de indeterminación³⁵⁴ constituyen, junto al postulado cuántico, el principio de complementariedad de Bohr y a la interpretación estadística de Born, el núcleo esencial de la interpretación de Copenhague. Estas relaciones fueron derivadas en 1927 por Heisenberg³⁵⁵ en Copenhague en las siguientes circunstancias. En 1926 Schrödinger había dado, en Munich, un seminario sobre su nueva mecánica de ondas al que había asistido Heisenberg, que presentó unas objeciones que no fueron comprendidas³⁵⁶ por muchos de los asistentes, entre los cuales se encontraba W. Wien, quien, al responder a las palabras de Heisenberg, había señalado que Schrödinger había probado de una vez por todas que los “saltos cuánticos” eran absurdos y así había

351D. Cassidy, *Ibid.*, (p.207)

352En la introducción del citado artículo

353A menudo se las llama “principio”, pero Heisenberg siempre las llama, simplemente, “relaciones”. El nombre de “principio” fue atribuido por primera vez por A.E. Ruark en 1927. Jammer, *The philosophy of Quantum Mechanics*, J. Wiley & Sons. New York (1974) (p.74)

354El término más usado por Heisenberg, en el artículo que las presenta, es *Ungenauigkeit* (inexactitud, imprecisión), pues lo emplea en más de 30 ocasiones en este artículo, mientras que el término *Unsicherheit* (incertidumbre) aparece sólo dos veces y el término *Unbestimmtheit* (indeterminación) también sólo dos. “Incertidumbre” aparece en el Postscript, que, como veremos, fue redactado bajo la influencia de Bohr, y Heisenberg lo utiliza para acentuar la falta de seguridad subjetiva en el conocimiento de la magnitud de los observables. M. Jammer, *The philosophy of Quantum Mechanics*, *Ibid.* (p. 61)

Utilizaré normalmente el término “indeterminación” porque conlleva unas connotaciones más neutras y porque se usa habitualmente en la literatura del tema.

355Aunque Dirac ya se le había anticipado en el trabajo que publicó en 1926, donde escribió: “No se puede responder ninguna cuestión de la teoría cuántica que se refiera a la vez a los valores numéricos de p y de q ” M. Jammer, *The philosophy of Quantum Mechanics*, *Ibid.* (p 61)

356Según Jammer en *The philosophy of Quantum Mechanics*, *Ibid.* (p.56)

puesto fin a una teoría basada en nociones tan confusas como ésta³⁵⁷. Inmediatamente después, Heisenberg había escrito a Bohr sobre “el desafortunado desenlace de la discusión”³⁵⁸ y fue³⁵⁹ probablemente el contenido de dicha carta el que provocó que Bohr invitara a Schrödinger a pasar unos días en Copenhague, para tratar de la interpretación de la mecánica cuántica. Schrödinger aceptó.³⁶⁰ Naturalmente, Heisenberg también viajó a Copenhague; “no quería perderme estas discusiones tan importantes”, declararía Heisenberg años después.

Aunque Schrödinger había demostrado la equivalencia formal entre su mecánica de ondas y la mecánica de matrices de Heisenberg, había una gran distancia entre las interpretaciones conceptuales subyacentes a las dos formulaciones. Y fue durante la visita de Schrödinger a Copenhague cuando el conflicto entre los dos puntos de vista se hizo más abierto y profundo. La atmósfera que se respiraba en las discusiones se muestra claramente en la descripción que ofrece Heisenberg³⁶¹:

Pese a que Bohr solía ser muy respetuoso y amable al tratar con las personas, en esta ocasión parecía casi un fanático inflexible que no estaba dispuesto a transigir frente a su interlocutor ni permitirle a éste la más mínima vaguedad. Es imposible reproducir la pasión con la que ambas partes discutían; tampoco puedo describir lo profundamente ancladas que estaban las convicciones que se atisbaban tras las palabras de cada uno...[En aquellas conversaciones] cada uno luchaba con todas sus fuerzas por la interpretación de la recién obtenida representación matemática de la naturaleza.³⁶²

Esta carga emocional que se daba en el enfrentamiento entre las dos concepciones se percibe también en las famosas palabras que Schrödinger exclamó³⁶³: “Si realmente existen todos estos malditos saltos cuánticos he de lamentar haberme dedicado a la teoría cuántica”, a lo cual Bohr respondió: “Pero nosotros le estamos muy agradecidos por lo que hizo, ya que su trabajo ha hecho avanzar mucho la teoría”.

357 Una muestra de la atmósfera de la polémica que se respiraba en el ambiente se encuentra en W. Heisenberg “The Principle of Indeterminacy” Zurek y Wheeler (1967): “Wien decía que hay que terminar con los saltos cuánticos y todo el misticismo cuántico” (el subrayado es mío)

358 W. Heisenberg, *La parte y el todo*, Ellago Ediciones, Pontevedra, (1967), (p.100)

359 W. Heisenberg, *La parte y el todo*, *Ibid.* (p.100) y M. Jammer, *The philosophy of Quantum Mechanics*, *Ibid.* (p.56)

360 W. Heisenberg, *La parte y el todo*, *Ibid.* (p. 101)

361 W. Heisenberg, *La parte y el todo*, *Ibid.* (p.101)

362 Por la pasión y el posicionamiento radical de ambas partes enfrentadas se puede ver en el debate Schrödinger - Bohr un conflicto de *themata*, en el sentido de Holton, de características similares al que se produjo en el debate Einstein-Bohr.

363 M. Jammer, *The philosophy of Quantum Mechanics*, *Ibid.* (p57)

Aunque cada uno se mantuvo en su posición, el debate entre Schrödinger y Bohr evidenció la necesidad de clarificar la relación entre la teoría y los datos empíricos. Heisenberg, que participó activamente en las discusiones que se dieron en el Instituto Bohr, veía que se disponía de una descripción matemática libre de contradicciones pero no se sabía cómo usarla para la descripción de situaciones experimentales tan simples, como, por ejemplo, la traza de un electrón en una ³⁶⁴ cámara de niebla. Dirac y Jordan habían desarrollado la teoría matemática, basada en el trabajo de Born y Jordan³⁶⁵, y a Heisenberg y a Bohr les parecía que, si bien la compleción de este formalismo matemático les confirmaba su convicción de que nada se había de cambiar en la estructura formal de la mecánica cuántica, quedaba por solventar el gran problema de "expresar la conexión, sin ninguna contradicción, entre dicha estructura y el experimento"³⁶⁶. Así pues, cuando Schrödinger partió, Heisenberg y Bohr se quedaron en Copenhague tratando de encontrar una interpretación general de la mecánica cuántica y analizando para ello "experimentos mentalmente posibles"³⁶⁷.

Ni Bohr ni Heisenberg sabían cómo interpretar el sencillo experimento del paso del electrón tal como aparecía en la cámara de Wilson, puesto que no veían cómo podían unir de forma coherente, por una parte, el formalismo matemático de la mecánica de matrices, según el cual la trayectoria de un electrón no estaba definida porque no era observable y, por otra parte, las huellas del electrón que se observaban en la cámara de niebla. Cuando Bohr abandonó Copenhague para unas cortas vacaciones, Heisenberg siguió, a solas, reflexionando sobre este problema y, una noche, recordó la conversación que había mantenido con Einstein en la primavera de 1926. Cuando Heisenberg le había mostrado su opinión —en la más pura línea positivista— de que una buena teoría física sólo había de operar con cantidades observables, Einstein había respondido: "Sólo la teoría decide qué es lo que se puede observar"³⁶⁸. Entonces Heisenberg pensó que esta respuesta era la clave de la solución del problema y salió a pasear por el parque que hay junto al Instituto, meditando sobre las consecuencias de las palabras de Einstein. Entonces pensó que decir, como habitualmente se decía, que se observaba la trayectoria del electrón en la cámara de niebla era hablar demasiado a la ligera; quizás sólo se pudiera decir que se observaba "una sucesión discreta de puntos del electrón imprecisamente determinados"; porque realmente "de hecho, solamente se ven unas pocas gotitas de agua aisladas en la cámara, seguramente mucho más extensas que un electrón". Por tanto, se había planteado mal la pregunta de cómo, en la mecánica cuántica, se podía representar

364W. Heisenberg, *La parte y el todo*, *Ibid.* (p105)

365W. Heisenberg, "Quantum Theory and Its Interpretation", *Ibid.*, (p105)

366W. Heisenberg, "Quantum Theory and Its Interpretation", *Ibid.*, (p.105)

367W. Heisenberg, *La parte y el todo*, *Ibid.*, (p104)

368W. Heisenberg, *La parte y el todo*, *Ibid.*, (106)

matemáticamente la trayectoria del electrón en la cámara de niebla y la pregunta se había de plantear así: “¿se puede representar, en la mecánica cuántica, una situación en la que un electrón se encuentre aproximadamente —es decir, con una cierta imprecisión— en un lugar dado y además posea aproximadamente —también con cierta imprecisión— una velocidad dada?”.

Heisenberg regresó al Instituto, hizo los cálculos, vió que dicha situación sí se podía representar matemáticamente y calculó que el producto de las imprecisiones no podía ser menor que un número positivo que cumplía una relación con el *quantum* de Planck. Así Heisenberg concluyó que³⁶⁹ “quedaba finalmente establecida la conexión entre las observaciones en la cámara de niebla y la matemática de la mecánica cuántica”.

3.2 DERIVACIÓN DE LAS RELACIONES DE INDETERMINACIÓN

Para demostrar la conexión entre las observaciones en la cámara de niebla y el formalismo matemático, Heisenberg razonó —utilizando la teoría de Dirac-Jordan³⁷⁰—de la siguiente manera:

Para una distribución gaussiana de la coordenada de posición q , la función de estado es:

$$\psi(q) = \text{const.} \exp[-q^2/2(\delta q)^2]$$

siendo δq la indeterminación en la posición, es decir, “la precisión³⁷¹ con la que se conoce el valor de q ”.

Por otra parte, la distribución del momento es $|\varphi(p)|^2$ donde $\varphi(p)$ se obtiene por la transformación de Fourier:

$$\varphi(p) = \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-2\pi i p q / h) \psi(q) dq$$

369W. Heisenberg, *La parte y el todo*, *Ibid.*, (p.106)

370W. Heisenberg, “The physical content of quantum kinematics and mechanics” en *Quantum theory and measurement*, Wheeler and Zurek (p.62-84), según la versión de M. Jammer en *The philosophy of Quantum Mechanics*” (p 62-63)

371W. Heisenberg, “The physical content of quantum kinematics and mechanics”, *Ibid.*, (p 64)

e, integrando, Heisenberg obtuvo

$$\varphi(p) = \text{const.} \exp(-2\pi^2 p^2 (\delta q)^2 / h^2)$$

que mostró que

$$\delta p \delta q = h/2\pi.$$

Por tanto, Heisenberg había probado que, según el formalismo matemático de la mecánica cuántica, no se podían conocer simultáneamente la posición y la velocidad de una partícula. Le faltaba probar si esta conclusión era compatible con la máxima precisión obtenible en los experimentos de medida. Pensaba que sí, “porque los mismos procesos que tienen lugar durante el experimento, durante la observación, deben acatar las leyes de la mecánica cuántica”³⁷². Y Heisenberg se dispuso a estudiar la cuestión.

Partió³⁷³ del principio operacional según el cual un concepto científico constituye un código condensado de operaciones y su significado es una relación definida de impresiones sensoriales del observador. Así, Heisenberg escribió³⁷⁴ en su histórico artículo de 1927:

Cuando se quiere clarificar qué se entiende por las palabras “posición del objeto”, por ejemplo, del electrón (relativa a un determinado sistema de referencia), entonces se debe especificar definidos experimentos con cuya ayuda se pueda medir “la posición del electrón”; si no es así esta palabra no tiene significado

Aquí Heisenberg se ayudó del recuerdo de una conversación que había mantenido con B. Drude³⁷⁵, un compañero de estudios de Gotinga, cuando debatían sobre las dificultades de la representación de trayectorias electrónicas en el átomo. Drude había sugerido construir un microscopio de tan gran poder de resolución que permitiera ver directamente la trayectoria de un electrón. Tal microscopio

372W. Heisenberg, *La parte y el todo*, *Ibid.*, (p 107)

373M. Jammer, *The philosophy of Quantum Mechanics*, *Ibid.* (p 63)

374W. Heisenberg, “The physical content of quantum kinematics and mechanics”, en *Quantum theory and measurement*, A. Wheeler and W.H. Zurek (eds.), Princeton University Press, Princeton (1983), (p 64)

375W. Heisenberg, *La parte y el todo*, *Ibid.*, (p 107)

no podría funcionar con luz visible, pero sí con rayos γ , porque, según las leyes ópticas de resolución, la precisión del microscopio es mayor cuanto menor es la longitud de onda λ de la radiación que ilumina³⁷⁶. De esta manera, Heisenberg pensó en el experimento mental de intentar determinar la posición de un electrón con la ayuda de un microscopio de rayos γ ; pero entonces se encontró con el efecto Compton, es decir, con el hecho de que³⁷⁷

en el instante en el que se determina la posición — por tanto, en el momento en el que el fotón choca con el electrón — el electrón sufre un cambio discontinuo en el momento. Este cambio es mayor cuanto menor es la longitud de onda de la luz utilizada— es decir, cuanto más exacta es la determinación de la posición... Así, cuanto más precisamente se determina la posición, menos precisamente se conoce el momento y a la inversa.

Así pues, el cambio discontinuo en el momento, producido por el efecto Compton, aumenta al aumentar la precisión en la localización del electrón.

De forma similar, Heisenberg también mostró, con el análisis de un experimento Stern-Gerlach de medida del momento magnético, que la indeterminación con la que se mide la energía E es menor cuanto mayor es el tiempo empleado por el átomo para atravesar el campo que lo desvía y, utilizando la relación de de Broglie $\lambda = h/p$, Heisenberg concluyó que

$$\delta E \delta t \sim h$$

Así pues, Heisenberg llegó a la conclusión de que los conceptos utilizados en teoría clásica para la descripción de un sistema mecánico podían también definirse para procesos atómicos, pero los experimentos que ofrecían tales definiciones sufrían una indeterminación introducida por los procedimientos usados para la determinación simultánea de las dos cantidades, debido a las perturbaciones generadas por los instrumentos de medida sobre los sistemas medidos, que eran provocadas por las interacciones entre los dispositivos y los objetos.

³⁷⁶Según la siguiente relación, que ofrece el límite de exactitud en la posición: $\Delta x = \lambda / 2 \sin \alpha$, siendo Δx la mínima distancia a la que se pueden distinguir objetos, siendo λ la longitud de onda de la luz utilizada y siendo α el ángulo a través del cual la luz choca con la partícula que se pretende observar

³⁷⁷W.Heisenberg, “The physical content of quantum kinematics and mechanics”, *Ibid.* (p64)

3.3 EL PROBLEMA DE LA FALTA DE ANSCHAULICHKEIT³⁷⁸

El artículo de 1927, en el que Heisenberg derivó sus relaciones de indeterminación, llevaba por título “El contenido intuitivo de la mecánica y cinemática cuántica”. El término original alemán correspondiente a “intuitivo” es *anschaulich*, adjetivo que aparecía reiteradamente a lo largo del artículo, denotando claridad y visualización. La palabra *anschaulich* es difícil de traducir. La traducción más literal es “visualizable”. Y puesto que “ver” a menudo se utiliza como sinónimo de “entender” *anschaulich* se puede traducir por “inteligible” o “intuitivo”³⁷⁹.

Heisenberg era consciente de que la mecánica de matrices que había creado no era *anschaulich*, clara y visualmente satisfactoria, como lo era la física clásica. En cambio, la mecánica de ondas de Schrödinger en general se consideraba intuitiva y pictórica, porque retornaba a la continuidad y a la representabilidad de los fenómenos físicos en el espacio y en el tiempo; como, por ejemplo, la conceptualización directa de los electrones que se movían; así, un electrón en un átomo podría representarse como una nube de carga oscilante que evolucionaba continuamente en el espacio y el tiempo según la ecuación de movimiento.

Schrödinger había acusado a la mecánica de matrices de ser *unanschaulich*³⁸⁰. Por esta razón, Heisenberg quería quitarse este estigma y en su artículo de 1927 propuso modificar el significado del requerimiento de *Anschaulichkeit* rompiendo con la tradición clásica de la representabilidad espacio-temporal. Los electrones no eran *anschaulich* en sentido habitual, porque no podían describirse usando descripciones pictóricas cotidianas como la posición, la velocidad y la órbita. Heisenberg redefinió el término *anschaulich* y le otorgó el significado de satisfactorio en sentido positivista, es decir, consistente con el sistema formal y predecible sin ambigüedad a partir del resultado de los experimentos.

378 Término dotado de tantos significados que es difícil traducir. La frecuencia con la que aparece en los escritos de los científicos cuánticos de la época muestra el gran esfuerzo que éstos estaban realizando en la búsqueda de un significado claro para el formalismo cuántico, según J. Lacki, “Observability, *Anschaulichkeit* and Abstraction: A Journey into W. Heisenberg's Science and Philosophy”, en *100 Years W. Heisenberg's Works and Impact*, Ed. D. Papenfus, D. Lüst, W. P. Schleich (2002), Wiley-VCH Verlag GmbH & KgaA. Weinheim.

379 Hilgevoord, Jan y Uffin, “The Uncertainty Principle”, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (2014)

380 El carácter de *anschaulich* era uno de los valores de la filosofía de la vida. El ambiente intelectual alemán del momento valoraba el carácter pictórico e intuitivo, *anschaulich*, de las explicaciones científicas y los físicos, quizás inconscientemente, deseaban adaptarse al *Zeitgeist*, a la ideología dominante. Esta influencia se estudiará en el capítulo 5 de este trabajo

Así, Heisenberg pensaba que sus relaciones de indeterminación estaban tan firmemente construídas sobre la base del formalismo y de los experimentos cuánticos que las calificaba de *anschaulich*, es decir, claras e intuitivas, y a ello añadía afirmaciones contundentes. Así, consideraba que el formalismo de Dirac-Jordan era completo y, por tanto, las relaciones de indeterminación eran irrefutables; en consecuencia, futuros experimentos nunca alterarían la validez de los principios de la mecánica cuántica ni permitirían superar los límites impuestos por las relaciones de indeterminación³⁸¹.

3.4 RESPUESTA DE BOHR

Cuando Bohr leyó el artículo de Heisenberg aceptó las relaciones de indeterminación, pero no estuvo de acuerdo con el carácter general de la justificación que Heisenberg de ellas había presentado. Para Heisenberg la razón de la indeterminación era la discontinuidad cuántica, es decir, los cambios discontinuos producidos por el proceso de medida, independientemente de si se expresaba en lenguaje de ondas o de partículas; pero, en cambio, para Bohr la razón de la indeterminación era la imposibilidad de usar simultáneamente el lenguaje de ondas y el de partículas, puesto que sólo su uso combinado permitía una descripción completa de los fenómenos. Por esta razón, Bohr decía³⁸²: "Ese es el centro de toda la historia y hemos de empezar por aquí para entenderla", a lo cual Heisenberg respondía: "Bien, tenemos un esquema matemático consistente y éste nos dice todo lo que podemos observar. No hay nada en la naturaleza que no pueda ser descrito por este esquema matemático". Pero, como hemos visto, para Bohr las matemáticas no tenían el valor que tenían para Heisenberg, puesto que Bohr no creía que pudieran probar ninguna verdad física sino que tan sólo podían probar la consistencia de un formalismo.

Además, para Bohr la dualidad onda-partícula representaba un papel central porque Heisenberg, para derivar sus relaciones, en su análisis de los experimentos mentales, había usado las relaciones de Einstein-de Broglie, $\lambda = h/p$ y $v = E/h$ y estas relaciones conectaban los atributos de onda y los de partícula. Así, Heisenberg interpretaba que el *quantum* de luz que colisionaba con el electrón llevaba un momento $p = h/\lambda$, siendo λ la longitud de onda de la luz. Y ello para Bohr mostraba claramente la necesidad de las dos descripciones.

381 Aunque Heisenberg no llegó a probar estas aserciones, las fue repitiendo a lo largo del tiempo y llegaron a formar parte de la interpretación de Copenhague.

382 Citado por M. Jammer en "The philosophy of Quantum Mechanics", *Ibid.* (p. 66)

Bohr, durante sus vacaciones en Noruega, se había familiarizado tanto con la idea de la complementariedad³⁸³ que había vuelto a Copenhague con la convicción de que la dualidad onda-partícula, que se adaptaba perfectamente al marco de la complementariedad, constituía el adecuado punto de partida para la interpretación de la mecánica cuántica que estaban buscando. En cambio, Heisenberg³⁸⁴ en Copenhague — donde estando solo había podido dar una forma más libre a sus pensamientos— había decidido que la indeterminación fuera el punto de partida de dicha interpretación. Heisenberg pensaba que las relaciones de indeterminación eran consecuencias inferidas lógicamente del formalismo matemático y no veía la dualidad onda-partícula como una presuposición necesaria de la teoría; para él, cuando describía sus observaciones, era completamente irrelevante el hecho de emplear el término “onda” o el término “partícula”.

Después de varias semanas de discusión, Heisenberg aceptó³⁸⁵ que las relaciones de indeterminación constituían un caso especial del principio más general de la complementariedad. Heisenberg añadió a su artículo un “Postscript” en el que declaraba que, después que él hubo concluido su trabajo, Bohr le ofreció un nuevo punto de vista, que le permitió realizar una mayor profundización, puesto que, en su análisis, había olvidado aspectos fundamentales. Así Heisenberg escribió³⁸⁶:

Bohr me ha hecho ver que he olvidado puntos esenciales en el curso de diversos análisis en este artículo. Sobre todo, la incertidumbre en nuestra observación no surge exclusivamente de la aparición de discontinuidades sino que está relacionada directamente con la necesidad de atribuir igual validez a experimentos completamente diferentes que muestran la teoría corpuscular, por una parte, y la ondulatoria, por otra.

Al principio de esta cita se observa que el autor emplea la palabra “incertidumbre”, *Unsicherheit*, en lugar del término “imprecisión”, *Ungenauigkeit*, que es el que utiliza habitualmente en el artículo. “Incertidumbre” alude a la falta de seguridad del sujeto en el conocimiento de la magnitud de los observables y el uso de este término constituye una influencia de Bohr, quien veía, con satisfacción, que las relaciones de Heisenberg corroboraban su principio universal de la complementariedad. Así pues, para Bohr, la complementariedad ofrecía el marco general para las relaciones de

383El concepto de complementariedad se adecuaba a la fundamental actitud filosófica de Bohr—de quien Heisenberg decía que tenía tendencia a la generalización filosófica—, que estaba seguro de que los límites de nuestros medios de expresión constituyen nuestro principal problema filosófico. W. Heisenberg, “Quantum Theory and Its Interpretation”, *Ibid.*

384W. Heisenberg, “Quantum theory and Its Interpretation”, *Ibid.*, (p105)

385M. Jammer, *The philosophy of Quantum Mechanics*, *Ibid.*, (p 69)

386W. Heisenberg (1927), *Ibid.*, (p83)

indeterminación³⁸⁷ : cada relación $\delta p \delta q \geq h / 2\pi$ y $\delta E \delta t \geq h / 2\pi$ combinaba un símbolo referido a la imagen ondulatoria y un símbolo referido a la imagen corpuscular. Así pues, las relaciones de indeterminación eran el precio que se había de pagar para conciliar en una situación las nociones mutuamente excluyentes de onda y de partícula. Si el principio de complementariedad era un principio epistemológico general, las relaciones de incertidumbre constituían una prueba matemática de la validez de dicho principio en el mundo de la microfísica.

Por su contenido y por la repercusión que tuvo, el artículo de 1927, según Cassidy³⁸⁸, fue, más que ningún otro, el que situó a su autor entre los físicos dirigentes del siglo XX

4. INTERPRETACIONES DE LAS RELACIONES DE INDETERMINACIÓN

De las relaciones de indeterminación³⁸⁹ se han ofrecido diversas interpretaciones, entre las que destacan las siguientes:

En primer lugar, la interpretación no estadística, según la cual es imposible determinar con precisión los valores simultáneos de las variables canónicamente conjugadas que describen el comportamiento de una única partícula. Esta fue la interpretación propuesta por Heisenberg y durante años la dominante; prueba de ello es que fue adoptada por la mayoría de los libros de texto³⁹⁰. Esta interpretación según la cual “cuanto más exactamente medimos la posición de una partícula, menos sabremos sobre su momento”, fue iniciada por Heisenberg con su experimento mental del microscopio de rayos γ mediante el cual, en principio, parecía posible medir con precisión la posición de un electrón pero, debido al choque de la luz utilizada con la partícula, ésta se movía y cambiaba de posición.

Incidentalmente, este fenómeno constituye una de las numerosas muestras de la significativa función que los experimentos imaginarios han ejercido en el desarrollo de la mecánica cuántica, puesto que hemos visto que a menudo fueron utilizados para justificar o refutar principios teóricos fundamentales. Los experimentos de Renninger, germen de los posteriores IFMs, fueron también

387D. Cassidy, *Ibid.*, (p. 244)

388D. Cassidy, *Ibid.*, (p 240)

389M. Jammer “The philosophy of Quantum Mechanics”, *Ibid.*, (p.80)

390M. Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, *Ibid.*,(p.80)

diseñados por su autor con objetivos teóricos como mostrar la realidad de la onda que lleva el fotón y la existencia de medidas sin interacción.

Volviendo a la interpretación de las relaciones de indeterminación, según Popper, la interpretación de Heisenberg se puede entender de dos maneras:

De la primera manera, la partícula tiene posición y momento exactos, es decir, trayectoria exacta, pero ambos no pueden ser simultáneamente medibles. En palabras de Popper, “la naturaleza nos oculta ciertas magnitudes físicas, la combinación de ambas magnitudes, la *positio cum momento*, o sea, la trayectoria”; así pues, las relaciones de indeterminación constituyen una limitación de nuestro conocimiento. Según Popper³⁹¹, esta manera de entender las relaciones de indeterminación no cumplía el objetivo que Heisenberg se había propuesto de eliminar todos los inobservables, a los que Popper calificaba de “elementos metafísicos”, porque contiene la noción de trayectoria, que, a través del experimento de rayos γ , hemos visto que no se puede observar.

En cambio, según la segunda manera de entender la interpretación de Heisenberg, era inadmisibles atribuir a la partícula una *positio cum momento* o trayectoria claramente definida y, por esta razón, la partícula no tenía trayectoria, sino sólo tenía o una posición exacta en combinación con un momento inexacto o un momento exacto con una posición inexacta.

Pero Popper propuso³⁹² en 1934, una nueva interpretación, que a partir de 1965³⁹³ fue ganando aceptación; es la interpretación estadística, según la cual las relaciones de indeterminación no se entienden como enunciados que se refieren al comportamiento de partículas individuales sino como enunciados estadísticos, referidos a conjuntos de resultados que se han obtenido al medir los valores de las variables canónicamente conjugadas de los conjuntos de partículas. Según esta interpretación el producto de las desviaciones estándar de los valores de dichas variables tiene el límite inferior dado por las relaciones de Heisenberg.

Según la interpretación de Popper, dado un conjunto —que puede estar constituido por partículas o por experimentos realizados en una partícula que, después de cada experimento, se la retorna a su

391K. Popper, *Ibid.*, (p.338)

392K. Popper, *La lògica de la investigació científica*. Ed. Laia, Barcelona, (1985), (p.335)

393Según M. Jammer en *The philosophy of Quantum Mechanics*, *Ibid.*, (p.80)

estado inicial— del cual se seleccionan, en un cierto instante y con una cierta precisión (Δq), aquellas partículas que tienen una posición q , encontramos que su momento p presenta una dispersión aleatoria con un margen Δp , que es mayor cuanto menor sea Δq , tales que $\Delta q \Delta p \geq h / 4\pi$. Y viceversa. Popper incluso pensó, aunque erróneamente— como él mismo pronto se dió cuenta³⁹⁴—, defender su postura con un experimento mental que imaginó para determinar los valores exactos de la posición y el momento³⁹⁵.

En apoyo de su interpretación, Popper argumentaba que si la función de onda representaba el comportamiento, no de una partícula individual, sino de un conjunto de partículas, como mantenía la interpretación estadística³⁹⁶ que dió Born al formalismo de la mecánica cuántica, las relaciones de indeterminación, que se derivaban del formalismo cuántico, tampoco se tenían que referir a partículas individuales, sino que se habían de referir a conjuntos estadísticos de partículas. Es decir, si la función de onda se refiere a un conjunto de partículas las relaciones de indeterminación también. Así lo explicaba Popper³⁹⁷:

Reconozco que es verdad que las fórmulas de Heisenberg resultan de la teoría como conclusiones lógicas, pero de esta teoría no se sigue la *interpretación* de estas fórmulas como reglas que limitan la precisión alcanzable en las medidas en el sentido de Heisenberg [...]. Hasta ahora no se ha tenido suficientemente en cuenta que, a la deducción matemática de las fórmulas de Heisenberg a partir de las ecuaciones fundamentales de la teoría cuántica, le ha de corresponder, precisamente, una deducción de la *interpretación* de aquellas fórmulas partiendo de la interpretación de estas ecuaciones fundamentales³⁹⁸

Es decir, si se acepta la interpretación estadística de las ecuaciones fundamentales se ha de aceptar la interpretación estadística de las relaciones de Heisenberg, que se infieren de aquéllas. Precisamente la interpretación estadística de Born había resuelto la paradoja, según Popper³⁹⁹, de la

394En *Ibid.* (p. 365) reconoce que dicho experimento se basa en un error y que podría reemplazarse por el de EPR

395H. Margenau defendió elocuentemente la interpretación estadística de las relaciones de indeterminación. Señaló que éstas no se podían verificar tal como las presentaba Heisenberg en su experimento mental, pero sí cuando se las presentaba, como Popper, como una relación entre dispersiones de medidas, según M. Jammer en “Indeterminacy in Physics”, *Ibid.* (p. 592).

Aunque, según Jammer, no ha habido en la historia de la física un principio con tan escasa justificación empírica como éste, la interpretación estadística del principio de indeterminación ha tenido mucho más respaldo experimental que la no estadística. M. Jammer, *The philosophy of Quantum Mechanics*, *Ibid.*, (p.81)

396Cabe señalar que Born había seguido los pasos que había dado Einstein con su interpretación estadística de los *quanta* de luz

397K. Popper, *Ibid.*, (p. 347)

398K. Popper, *Ibid.*, (p. 352)

399K. Popper, *Ibid.* (p.344)

equivalencia entre dos imágenes cuánticas tan diferentes como la corpuscular y la ondulatoria y había mostrado que la teoría ondulatoria se podía considerar también como una teoría corpuscular, puesto que la ecuación de onda de Schrödinger se consideraba que ofrecía la probabilidad de encontrar el corpúsculo en una determinada región del espacio. Asimismo Popper alegaba que el mismo Heisenberg, por influencia de Bohr⁴⁰⁰, había utilizado la idea de que los procesos atómicos podían representarse tanto con la imagen corpuscular como con la imagen ondulatoria y la interpretación estadística de Born había mostrado que la teoría ondulatoria se podía tomar como una teoría corpuscular.

Además, finalmente Popper señalaba que la teoría cuántica se había de interpretar estadísticamente porque su actividad más importante —deducir los espectros atómicos— era estadística ya desde que Einstein había presentado su hipótesis de los fotones, puesto que, según esta hipótesis, se consideraba los efectos luminosos observados como fenómenos estadísticos, ya que eran debidos a la incidencia de gran número de fotones.

Por otra parte, Popper también aplicó⁴⁰¹ la interpretación estadística a un sencillo y célebre experimento mental propuesto por Einstein, que, aunque según Jeans constituía “una de las partes más difíciles de la nueva teoría cuántica”⁴⁰², Popper lo interpretó de forma tan clara, que incluso pudo parecer trivial. El experimento mental consistía en lo siguiente: Imaginemos un espejo semitransparente, que refleja una parte de la luz y deja pasar la restante. En principio, la probabilidad de que un fotón lo atravesase es igual a la probabilidad de que se refleje, es decir, $\frac{1}{2}$. Pero, si, por ejemplo, en un momento se ha observado que se ha reflejado un fotón, entonces, después de la observación, las probabilidades parece que, paradójicamente, de repente, se hayan convertido, respectivamente, en 0 y 1.

Heisenberg⁴⁰³ había descrito así dicho experimento:

Mediante el experimento [es decir, la medida por la cual encontramos el fotón reflejado] se ejerce una

400 Como Heisenberg reconoció en el Postscript de su artículo de 1927. Véase el apartado anterior sobre las relaciones de indeterminación.

401 K. Popper, *Ibid.*, (p. 363). Nos fijamos en este experimento mental porque es utilizado en el experimento de Renninger de 1953 y en los posteriores IFMs de Elitzur y Vaidman, puesto que el espejo semitransparente constituye un divisor de haz en el interferómetro Mach-Zehnder.

402 K. Popper, *Ibid.* (p. 363)

403 W. Heisenberg, *The Physical Principles of Quantum Mechanics, Ibid.*, (p.39)

clase de acción física (una reducción del paquete de ondas) desde el lugar donde se ha encontrado la mitad reflejada del paquete de ondas sobre otro lugar —tan alejado como se quiera— donde se sitúa la otra mitad del paquete. Y esta acción física se propaga con una velocidad superior a la de la luz.

La interpretación estadística que Popper ofrecía del experimento era la siguiente:

Quizás es totalmente erróneo correlacionar una onda con un solo corpúsculo aislado. Si suponemos por principio que la onda está relacionada con un conjunto de cuerpos iguales pero mutuamente independientes, la conclusión paradójica desaparece⁴⁰⁴.

Es decir, por término medio, la mitad de los fotones se transmiten y la otra mitad se reflejan, lo cual constituye una descripción más intuitiva de un fenómeno más fácilmente visualizable..

5. EL CONCEPTO DE INDETERMINACIÓN

5.1 DIFERENTES SIGNIFICADOS DEL TÉRMINO “INDETERMINACIÓN”

La noción de indeterminación que utilizó Heisenberg para enunciar sus famosas relaciones disponía de unas raíces conceptuales históricas, que se habían desarrollado en el campo de la filosofía y en el de la física, dominios en los que había sido previamente utilizada. Así, había sido usada con, al menos, tres diferentes significados⁴⁰⁵:

- 1) Indeterminación acausal, que denota un comportamiento no causal de los procesos físicos y, por tanto, implica una negación parcial o total del principio metafísico de causalidad, expresado en el enunciado “las mismas causas producen los mismos efectos”.
- 2) Indeterminación que denota un comportamiento impredecible de los procesos físicos, sin implicar necesariamente la renuncia al principio de la causalidad.
- 3) Indeterminación que denota una imprecisión de los procedimientos de medida.

⁴⁰⁴Según cita de Von Laue que ofrece K. Popper en *Ibid.*, (p. 364)

⁴⁰⁵M. Jammer, “Indeterminacy in Physics” (1973) en *Dictionary of the History of Ideas*. N. York. Vol 2 (p586-594)

Es evidente que la 1ª indeterminación implica la 2ª y que la 3ª indeterminación implica también la 2ª.

5.2 PRECEDENTES HISTÓRICOS DE LA NOCIÓN DE INDETERMINACIÓN

La concepción más próxima a la noción de indeterminación la encontramos en uno de los filósofos griegos preferidos de Heisenberg, Platón⁴⁰⁶, quien mantenía que el mundo físico era una copia imperfecta del mundo perfecto de las ideas y si bien de este mundo inteligible se podía hablar con seguridad y certidumbre, porque estaba regido por las leyes absolutas e inmutables del estricto orden matemático, del mundo material sólo se podía hablar con inseguridad e incertidumbre, porque en él imperaba el desorden y el caos del cambio continuo e impredecible.

Un ejemplo más claro de indeterminación en la filosofía griega es la teoría del *clinamen* (desviación) atribuida a Epicuro y construida sobre el estricto determinismo de la teoría atómica de Demócrito. Según expresa Lucrecio⁴⁰⁷ en *De rerum natura II*, “Cuando los átomos están viajando en dirección rectilínea a través del espacio vacío por su propio peso, en cualquier tiempo y lugar impredecible, se desvían un poco de su camino, lo suficiente como para que tú puedas llamarlo un cambio de dirección”. Se supone⁴⁰⁸ que Epicuro creó la noción de *clinamen* para responder a la objeción de que los átomos que se movieran con la misma velocidad en dirección vertical no podrían encontrarse nunca y con ella rompía la infinita cadena de la causalidad y violaba la máxima de Leucipo según la cual “nada ocurre por azar, sino que hay una razón y una necesidad para cada cosa”⁴⁰⁹. Así pues, la noción de indeterminación de Epicuro, que se puede considerar como indeterminación acausal e indeterminación de comportamiento impredecible, le permitió introducir la noción de libertad en el marco de la teoría materialista de Leucipo y Demócrito.

Por otra parte, con la aparición de la ciencia moderna, según Heisenberg, había también aparecido el concepto de causa que Heisenberg veía en la ciencia de su época, según el cual el término *causa* se refería a la existencia material que precedía a la existencia que se trataba de explicar y que de algún modo la había producido. Heisenberg encontraba en Kant la adecuada explicación del significado del término *causa* tal como se había hecho usual:

406 Platón, “Timeo”, “La República”, *Obras completas*, Ed. Aguilar, Madrid (1974)

407 Lucrecio, *De rerum natura*. Alianza Editorial, Madrid (2013)

408 J. Ferrater Mora, *Diccionario de Filosofía* Vol 1 (p.523)

409 N. Abbagnano, *Historia de la filosofía*, Vol 1, Montaner y Simon, Barcelona (1978), (p. 42)

“Cuando experimentamos que algo ocurre, presuponemos en todo caso que algo ha precedido a aquella ocurrencia; algo de lo que ella se sigue según una regla’ ”. Así, el principio de causalidad era “equivalente a la suposición de que el acontecer de la Naturaleza está unívocamente determinado, de modo que el conocimiento preciso de la Naturaleza o de cierto sector suyo basta, al menos en principio, para predecir el futuro. Precisamente la Física newtoniana se hallaba estructurada de modo tal que a partir del estado de un sistema en un instante determinado podía preverse el futuro movimiento del sistema”⁴¹⁰.

Este concepto de causalidad es el que Heisenberg consideraba propio del determinismo, entendiendo por tal la doctrina de que existen leyes naturales fijas, que determinan unívocamente el estado futuro de un sistema a partir del actual.

El determinismo se había impuesto con el éxito de la física newtoniana. El representante más influyente del determinismo había sido Laplace, quien mantenía que cualquier estado de un sistema mecánico puede predecirse con total exactitud cuando se conocen completamente las condiciones iniciales en las que éste se encuentra, pero cuando esto último no ocurre hay que recurrir al conocimiento por probabilidades⁴¹¹. Así pues, se había hecho célebre el siguiente pasaje de Laplace⁴¹², escrito en 1820:

Una inteligencia que conociera en un momento dado todas las fuerzas que actúan en la Naturaleza y la situación de los seres de los que se compone, que fuera suficientemente vasta para someter estos datos al análisis matemático, podría expresar en una sola fórmula los movimientos de los mayores astros y de los menores átomos. Nada sería incierto para ella, y tanto el futuro como el pasado estarían presentes ante su mirada

Pero a mitad del siglo XIX la influencia del determinismo laplaciano empezó a decaer y de nuevo apareció la noción de indeterminación; era una indeterminación entendida como contingencia. Uno de los primeros en considerar que los hechos contingentes —es decir, aquellos hechos cuyos opuestos no implican contradicción— eran posibles en física fue A.A.Cournot. Para él, sólo había

410W. Heisenberg, “Atomphysik und Kausalgesetz” (1952) *Gesammelte Werke*. Series B. Springer-Verlag. Berlin (1985) Este trabajo constituye una muestra de que, cuando Heisenberg se hizo famoso, escribió gran número de ensayos y pronunció gran número de conferencias, en estilo divulgativo, sobre la evolución de ideas filosóficas estrechamente relacionadas con su trabajo en física, como el determinismo y la causalidad.

411 Argumento que recuerda al que, más adelante, veremos que también ofrecía Heisenberg para negar la causalidad
412W. Heisenberg, “Atomphysik und Kausalgesetz”, *Gesammelte Werke*. Series C. Piper Verlag. Berlin (1985) (p 702)

conocimiento probable, aunque cada vez se acercara más al conocimiento, nunca alcanzado, de la realidad tal como es en “en sí misma”. Así⁴¹³, para Cournot, las leyes que construye la ciencia eran sólo aproximaciones, ya que la realidad física es contingente.

Renouvier⁴¹⁴, siguiendo a Cournot, negaba la estricta validez del principio de causalidad. Su punto de partida era su rechazo del infinito, al que veía como un concepto vacío. También negaba la continuidad, porque la continuidad suponía un infinito de gradaciones. Y rechazaba la relación causal entre dos fenómenos distintos porque dicha relación se habría de basar en la posibilidad de concebir estos dos fenómenos como conectados uno al otro por una cadena continua de fenómenos intermedios⁴¹⁵.

Ideas similares compartía Boutroux, cuya filosofía de la naturaleza estaba basada en la noción de contingencia; este pensador, que pertenecía a la corriente del espiritualismo francés, consideraba que el determinismo riguroso tal como se expresaba en las leyes científicas era una inadecuada manifestación de una realidad que él consideraba que estaba sujeta a una contingencia radical.

El rechazo del determinismo clásico también jugó un papel importante en el pensamiento filosófico de C.S.Peirce, cuya teoría del tychismo (del griego τύχη, “azar”) postulaba que “el azar es un factor básico en el universo”. Uno de los argumentos que presentaba Peirce contra los necessitaristas — los partidarios de la doctrina según la cual todo lo que acontece sucede por necesidad y no hay margen para el azar— era la incapacidad de éstos para probar su posición de forma empírica, es decir, mediante observación y medida de los procesos físicos de la naturaleza. La esencia de su posición era, según Peirce, “que ciertas cantidades continuas tienen ciertos valores exactos”. Pero ¿cómo puede la observación determinar el valor de una cantidad “con un probable error absolutamente nulo?”. Y analizando el proceso de observación experimental, anticipando una idea similar a la de Heisenberg, Peirce llegó a la conclusión de que el azar, y no la indeterminación provocada por nuestra ignorancia, es un factor irreducible en los procesos físicos. Así Peirce escribía en 1892:

413M.Jammer, “Indeterminacy in Physics”, *Ibid.*, (p.587)

414M.Jammer, *Conceptual development of Quantum Mechanics*, *Ibid.*,(p 174)

415Es de destacar también que el contigentismo (y fenomenalismo) de Renouvier influyeron en James, que le dedicó su libro *Algunos problemas de filosofía* llamando a Renouvier “uno de los grandes de los caracteres filosóficos”, según M. Jammer en *Conceptual Development of Quantum Mechanics*(p.183). James desempeñó un importante papel en el desarrollo de la mecánica cuántica, especialmente a través de su influencia en la formación de la nueva concepción de Bohr sobre la ciencia física, como hemos visto en el apartado 7.2 del capítulo “La concepción filosófica de Bohr” de este trabajo.

Intenta verificar una ley de la naturaleza y encontrarás que cuanto más precisas sean tus observaciones con más seguridad mostrarán desviaciones irregulares de la ley. Estamos acostumbrados a atribuir éstas, y no digo que equivocadamente, a errores de la observación; pero no podemos explicar tales errores...Busca sus causas suficientemente atrás y te verás forzado a admitir que siempre son debidos a una determinación arbitraria o azar.⁴¹⁶

Hasta este momento encontrábamos la noción de indeterminación sólo entre filósofos, no entre físicos, quienes, siguiendo el paradigma de una ciencia determinista, suponían que la precisión alcanzable en las observaciones era teóricamente ilimitada; y, aunque admitieran que las medidas siempre conllevan errores, confiaban que, con los avances técnicos, estos errores serían cada vez menores.

El primer físico que cuestionó el estricto determinismo de las leyes físicas fue⁴¹⁷L.Boltzmann, que en 1895 declaraba:

Mencionaré la posibilidad de que las ecuaciones fundamentales del movimiento de las moléculas individuales sean sólo fórmulas aproximadas que den valores promedios, resultando, según el cálculo de probabilidad, de las interacciones de muchas entidades independientes que se mueven

Y el sucesor de Boltzmann en la Universidad de Viena, F.Exner, propuso una interpretación estadística del comportamiento aparentemente determinista de los fenómenos macroscópicos, que él consideraba que constituían el resultado de una gran cantidad de procesos que eran probabilísticos a nivel microscópico. Así Exner en 1919 declaraba:

A partir de una multitud de hechos [...] pueden inferirse leyes que son válidas para el estado promedio de esta multitud, mientras los hechos individuales pueden permanecer indeterminados. En este sentido el principio de causalidad se mantiene para todos los sucesos macroscópicos sin ser necesariamente válido para el microcosmos. También se sigue que las leyes del macrocosmos no son leyes absolutas sino más bien leyes de probabilidad [...] Predecir en física el resultado de un proceso individual es imposible.⁴¹⁸

416M.Jammer, *Conceptual Development of Quantum Mechanics*, *Ibid.* (p.175) y M. Jammer, "Indeterminacy in Physics", *Ibid.*, (p.587)

417M. Jammer "Indeterminacy in Physics", *Ibid.*, (p.587)

418M. Jammer "Indeterminacy in Physics", *Ibid.*, (p.588)

“
“

Aunque no fueron muchos los científicos que aceptaron estas nuevas concepciones, ejercieron una gran influencia en el pensamiento de un notable número de físicos, entre los que se encontraba Schrödinger⁴¹⁹. Así, Poincaré—considerado⁴²⁰ el último de los grandes teóricos de la física clásica—, que de joven había leído los trabajos de Renouvier y Boutroux, manifestaba, en 1904, unas consideraciones probabilísticas, después de predecir que la teoría de los *quanta* llevaría a la revolución más radical que hubiera habido en física desde Newton⁴²¹:

Los hechos que nos parecen simples serán sólo el resultado de un gran número de hechos elementales que la ley del azar llevará a un solo objetivo. En ese caso una ley física tomará un aspecto totalmente nuevo; ya no será más una ecuación diferencial; sino que tomará el carácter de una ley estadística.

Poincaré dudaba de si las ecuaciones diferenciales eran todavía el instrumento apropiado para expresar las leyes de movimiento y esta sospecha era una manera de mostrar sus dudas sobre la validez del principio de causalidad, porque una ecuación diferencial suponía un cambio continuo o una cadena de hechos, como implicaba la relación de causalidad.

Este pasaje ya había llamado la atención de de Broglie, quien había manifestado que todos los jóvenes de su generación que se interesaban por la física matemática se habían nutrido de los libros de Poincaré. Y entre estos jóvenes se encontraban, sin duda, los creadores de la física cuántica.

La influencia de Poincaré entre los físicos jóvenes se mostraba en C.G.Darwin, quien había traducido al inglés el artículo del matemático francés “Sur la théorie des quanta”. C.G.Darwin había sido uno de los primeros en buscar una formulación consistente de los fundamentos teóricos de la teoría cuántica. Así, en 1919, escribía:

Hace tiempo que siento que la base fundamental de la física se encuentra en un estado desesperado. Los grandes éxitos positivos de la teoría cuántica han acentuado, no sólo su valor, sino también las contradicciones esenciales sobre las que descansa[...] Puede ser que sea necesario hacer cambios fundamentales en nuestras ideas del espacio y el tiempo[...] o incluso, en último recurso, dotar a los electrones de libre albedrío⁴²²

419 Ver el apartado “La herencia de Boltzmann y Exner” en el capítulo dedicado al pensamiento filosófico de Schrödinger de este trabajo

420 M. Jammer, *Conceptual Development of Quantum Mechanics, Ibid.*, (p 177)

421 M. Jammer, *Conceptual Development of Quantum Mechanics, Ibid.*, (p 177)

422 M. Jammer, *Conceptual Development of Quantum Mechanics, Ibid.* (p.178)

“Dotar a los electrones de libre albedrío” era una metáfora antropomórfica para una indeterminación acausal que a C.G.Darwin le habían sugerido los descubrimientos de la teoría cuántica, como la impredecible emisión de electrones en una sustancia radiactiva y las impredecibles transiciones de un nivel de energía a otro en el átomo.

También el estudio de los efectos de las fluctuaciones brownianas había puesto de manifiesto la limitación de la sensibilidad de los aparatos electrónicos de medida, y con ella los límites de los instrumentos de medida en general. Así pues, la física clásica, a principios de la década de los 20, había tenido que abandonar el supuesto de una precisión ilimitada y, en cambio, aceptar una indeterminación de impredecibilidad en sus observaciones.

Por otra parte, en el medio cultural⁴²³ en el que vivían los físicos centroeuropeos de lengua germana⁴²⁴ de la década de los 20 predominaban las corrientes de pensamiento antirracionalista y vitalista, que exaltaba la vida y la experiencia inmediata. Esta filosofía de la vida, que estaba ampliamente difundida y era muy confusa, se definía de forma negativa, es decir, se perfilaba por los términos de aquellas nociones a las que se oponía, como la noción de causalidad. Así, quienes proponían esta filosofía de la vida sentían aversión por la relación de causalidad y rechazaban la concepción mecanicista de la física clásica. En este ambiente intelectual se veía las ciencias exactas y naturales⁴²⁵ como frías disciplinas que reducían los procesos naturales a precisas fórmulas, abstractas y universales, que no llegaban a captar la auténtica realidad de los fenómenos, porque éstos eran, por el contrario, concretos y cambiantes. Se creía que el científico de mentalidad determinista pretendía, con su razón cartesiana, entender la Naturaleza, a través de unas relaciones causales, que él imponía, pero que no se daban realmente en el mundo y se presuponía una noción de “causa como conformidad a la ley”, según la cual todo lo que acontecía en la Naturaleza estaba sujeto a leyes exactas que se cumplían sin excepción.

423P.Forman, como veremos en el capítulo quinto de este trabajo, ha realizado un estudio sociológico del tema en *Cultura en Weimar, causalidad y teoría cuántica, 1918-1927*. Alianza Universidad. Madrid (1988)

424En cambio, vivían en un ambiente intelectual completamente diferente los físicos que trabajaban en Francia, Gran Bretaña y USA; la diferencia era debida principalmente a la penosa situación en la que vivía la sociedad alemana a consecuencia de la derrota en la I Guerra Mundial, según Forman.

425Los físicos alemanes antes de la I Guerra Mundial disfrutaron de un prestigio que después de ésta se convirtió en hostilidad, por su implicación en la creación de tecnología bélica. Así, las declaraciones antideterministas de los físicos posteriores a la guerra ayudaban a éstos a integrarse en los valores de su sociedad, según Forman . *Ibid*

6. LA RELACIÓN DE CAUSALIDAD

En este clima intelectual vivían y trabajaban los creadores de la mecánica cuántica, entre ellos, Heisenberg, quien concluía su histórico artículo de 1927⁴²⁶ con la siguiente declaración anticausal:

Lo que es erróneo en la formulación fuerte de la ley de la causalidad, “Cuando conocemos el presente exactamente, podemos predecir el futuro” no es la conclusión sino la hipótesis. En principio no podemos conocer el presente con todo detalle. Por esa razón cada cosa observada es una selección de un conjunto de posibilidades y una limitación sobre lo que es posible en el futuro. Como el carácter estadístico está tan íntimamente relacionado con la inexactitud de todas las percepciones es posible preguntar si todavía hay oculto, tras el universo estadístico de la percepción, un mundo 'verdadero', en el que la ley de la causalidad sería válida. Pero tal especulación nos parece, por decirlo explícitamente, inútil y sin sentido. La Física sólo debe describir la correlación de las observaciones. Uno puede expresar el verdadero estado de los hechos mejor de esta manera. Ya que todos los experimentos están sujetos a las leyes de la mecánica cuántica y, por tanto, de la relación anterior ($p_i q_i \approx h$) se sigue que la incorrección de la ley de la causalidad es una consecuencia definitivamente establecida de la mecánica cuántica.

Este pasaje tuvo gran repercusión. En primer lugar, muestra la conclusión filosófica que el mismo Heisenberg extrajo de sus relaciones de indeterminación. Esta conclusión ofrece una indeterminación por imprecisión y una indeterminación acausal, puesto que, para Heisenberg, la indeterminabilidad de los valores iniciales impedía la predictibilidad de los valores futuros y negaba un significado operacional a la causalidad.

En el enunciado condicional que constituye la formulación fuerte⁴²⁷ de la ley de la causalidad, 'Si conocemos con precisión el presente, entonces somos capaces de predecir el futuro' el antecedente nunca puede ser verdadero; por tanto, infirió Heisenberg, el enunciado condicional es falso. Según

426Para Forman este artículo representa la culminación del espíritu anticausal que se dió después de que, en 1926, Born propusiera la interpretación probabilística de la función de onda y manifestara que se sentía inclinado a abandonar el determinismo en el mundo atómico. En los meses siguientes hubo numerosas manifestaciones de físicos alemanes declarando que la mecánica cuántica mostraba que la ley de la causalidad no se podía mantener.

427Heisenberg se estaba refiriendo a la noción laplaciana de determinismo, tal como hemos visto anteriormente. Para Heisenberg dicha noción era equivalente a la noción kantiana de causalidad, que no podía aceptar en física atómica; porque en esta ciencia se presentan situaciones como la siguiente: cuando un átomo emite partículas no puede predecirse el tiempo de emisión, tan solo el tiempo promedio en el que tendrá lugar la emisión; así pues, no podemos encontrar un hecho anterior al cual deba seguir la emisión según una regla. Las leyes de la mecánica cuántica, concretamente las relaciones de indeterminación, no permiten conocer exactamente la situación en el interior del átomo, argumentaba W.Heisenberg, *Física y filosofía*. La isla, Buenos Aires, (1959), (p 68)

M.Schlick⁴²⁸, esta solución que dió Heisenberg al problema de la causalidad resultó sorprendente en la filosofía moderna, porque, a pesar de que con ella pretendió solventar un problema que había sido debatido durante muchas generaciones, nunca se le había dado esta respuesta.

Sin embargo, la refutación que Heisenberg dió de la ley de causalidad no es lógicamente correcta, porque un enunciado condicional no es falso cuando lo es el antecedente. Por esta razón, H.Bergmann⁴²⁹, en 1929, mantenía que la mecánica cuántica no refutaba la ley de la causalidad, aunque sí mostraba su inaplicabilidad. Pero, desde el punto de vista operacionalista de Heisenberg en 1927, “inaplicabilidad” e “invalidez” eran sinónimos⁴³⁰.

Este carácter positivista aparece también en la cita anterior en la que Heisenberg manifestó que no tiene sentido la pregunta de si, en el fondo, existe también un mundo real causal, oculto tras el mundo fenoménico, aparentemente no causal. No tiene sentido porque la ciencia física se ha de limitar a describir relaciones entre observaciones. Mas dicha manifestación de positivismo no es consistente con el punto de partida del argumento que había llevado a Heisenberg a las relaciones de indeterminación, con el enunciado de Einstein de que “sólo la teoría decide qué es lo que puede observarse”. Y con el tiempo, en los años sucesivos, Heisenberg cambió su posición, como veremos, respecto al positivismo.

Y también cambió su actitud respecto a la relación de causalidad. Así, en unas conferencias impartidas tres años después, en 1930, mostró dicho cambio. Siguió formulando la ley de la causalidad con el enunciado⁴³¹: “Si en un cierto momento se conocen todos los datos de un sistema dado entonces es posible predecir de forma inambigua el comportamiento físico del sistema también en el futuro”; pero manifestó que en este enunciado condicional lo que es falso es el consecuente — recordemos que anteriormente Heisenberg había incidido en el hecho de que era falso el antecedente—, aunque el antecedente sea verdadero, porque el acto de la medición cuántica tan solo puede ofrecer resultados probabilísticos. Así, en Diciembre de 1930, en Viena, Heisenberg manifestaba que⁴³²: “El segundo miembro de la formulación clásica de la causalidad es falso, porque a partir de la función de Schrödinger el contenido físico de los sistemas en general sólo puede predecirse estadísticamente “ Y unos meses antes, en Königsberg, había ilustrado esta idea con la

428M. Jammer, *The philosophy of Quantum Mechanics*, *Ibid.*, (p.75)

429M. Jammer, *The philosophy of Quantum Mechanics*, *Ibid.*, (p.75)

430Jammer, *The philosophy of Quantum Mechanics*, *Ibid.*, (p.75)

431W. Heisenberg, “Die Rolle der Unbestimmtheitsrelationen in der modernen Physik”. *Gesammelte Werke*. Series C. Piper Verlag. Berlin (1985), (p.45)

432W. Heisenberg, “Die Rolle der Unbestimmtheitsrelationen in der modernen Physik”, *Ibid.*, (p.45)

siguiente comparación⁴³³:

Mientras que en la teoría clásica el estado del sistema se caracterizaba por la información de las coordenadas y el impulso, en la teoría cuántica se representa por una *Función* en el espacio de configuraciones, que indica cuán probable es que las coordenadas y los impulsos tengan determinado valor, si los medimos. Esta función de estado (“Función de Schrödinger”) permite así en general sólo afirmaciones inexactas sobre el futuro de un experimento

No obstante, sorprendentemente, Heisenberg en la misma conferencia ofrecida en Viena había admitido que hay casos especiales en los que⁴³⁴ “también se puede mantener un cierto 'grado de determinismo' —si puedo decirlo— en la teoría atómica”. Así, una causalidad restringida se podía mantener con pleno significado. Y Heisenberg continuaba: “Si en un cierto momento se conocen todos los datos de un sistema aislado, existen, en cualquier momento posterior, experimentos el resultado de los cuales puede ser exactamente predicho, si el sistema no está sujeto a otras perturbaciones que las necesarias para la realización del experimento” Y, reconociendo el asombro que sus manifestaciones podían provocar, añadía:”Esta formulación es algo incómoda, pero muestra claramente los límites dentro de los que se puede mantener la mecánica cuántica como teoría causal. Si exactamente indica una ley de la causalidad o no es naturalmente una pura cuestión de gusto”

Por todo ello no sorprende que, años después, en 1952 encontremos las siguientes manifestaciones de Heisenberg⁴³⁵ en las que negaba la relación de causalidad con suma cautela:

Una de las más interesantes consecuencias generales de la moderna Física atómica la constituyen las transformaciones que bajo su influjo ha sufrido el concepto de las leyes naturales o de la regularidad de la Naturaleza. En los últimos años, se ha hablado a menudo de que la moderna Física atómica parece abolir la ley de la causa y el efecto o por lo menos dejar parcialmente en suspenso su validez⁴³⁶, de modo que no cabe seguir admitiendo propiamente que los procesos naturales estén determinados por leyes.

En resumen, como hemos podido apreciar, hubo una evolución en la actitud de Heisenberg ante la ley de la causalidad. Así, en dicha evolución hemos encontrado diferentes apreciaciones por parte

433 W.Heisenberg, “Die Rolle der Unbestimmtheitsrelationen in der modernen Physik”, *Ibid.*, (p.44)

434 W.Heisenberg, “Kausalgesetz und Quantenmechanik”*Gesammelte Werke*.Series C, *Ibid.*,(p.37)

435W. Heisenberg, “Atomphysik und Kausalgesetz”.*Gesammelte Werke*. Series C. *Ibid.* (p.376)

436El subrayado es nuestro

de Heisenberg: En primer lugar, había negado la causalidad; por dos razones: porque no se pueden conocer todas las condiciones iniciales y porque la función de onda sólo ofrece resultados probabilísticos; pero posteriormente la había llegado a admitir, en el caso de que fuera posible conocer todas las condiciones iniciales de un sistema cerrado en el que se pudieran controlar las perturbaciones provocadas por el experimento.

7. EL POSITIVISMO DE HEISENBERG

En un principio, especialmente en sus históricos artículos de 1925⁴³⁷ y 1927⁴³⁸, vemos un Heisenberg positivista y operacionalista. Así, como positivista, Heisenberg mantenía que la física había de limitarse a la descripción de las relaciones entre percepciones, que la trayectoria del electrón existía sólo cuando la observábamos, que cuando no se observaba el electrón no podía decirse nada de él y, por consiguiente, no podía tampoco saberse qué hacía ni qué era. Por otra parte, como operacionalista, mantenía que un concepto físico sólo tenía significado si se indicaba un procedimiento definido para medir la cantidad referida por dicho concepto.

Sommerfeld, profesor y mentor de Heisenberg, consideraba⁴³⁹ que éste era un devoto seguidor de Mach⁴⁴⁰ y, según Jammer⁴⁴¹, a Heisenberg, que fue muy influido por el positivismo de principios de la década de los 20, Wittgenstein le había impresionado vivamente. Así, percibimos que en los primeros trabajos de Heisenberg resuenan las últimas palabras del *Tractatus*, “De lo que no se puede hablar, hay que guardar silencio”⁴⁴².

Así, vemos que Heisenberg, al buscar el significado de los enunciados que utilizaba, se encontraba que términos fundamentales de la vida cotidiana y de la física clásica no tenían sentido en la teoría cuántica. Heisenberg repetía con frecuencia que la estrategia de Einstein al empezar a construir su teoría de la relatividad⁴⁴³ constituía, para él, un modelo a imitar. De la misma manera que Einstein vió que no tenía sentido hablar de la simultaneidad de dos hechos espacialmente distantes antes de

437 Ver el apartado 2 de este capítulo

438 Ver el apartado 3 de este capítulo

439M. Jammer, *The philosophy of Quantum Mechanics*, *Ibid.* (p. 58)

440Ver el apartado “La influencia de Mach” del capítulo cuarto, dedicado al pensamiento filosófico de Schrödinger.

441M. Jammer, *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, *Ibid.*, (p. 209)

442L. Wittgenstein, *Tractatus logico-philosophicus*. Edit. Laia. Barcelona (1981)

443M. Jammer, *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, *Ibid.*, (p 210). Tanto en Munich, donde Heisenberg escribió su tesis bajo la guía de Sommerfeld, como en Gotinga, donde trabajó con Born, se estudiaba la teoría de la relatividad con fervor.

realizar una adecuada sincronización de los relojes⁴⁴⁴, así también Heisenberg vió⁴⁴⁵ que “no tenía sentido hablar de la posición de una partícula con una velocidad definida” antes de describir un experimento por el cual dicha posición pudiera medirse.

En sus artículos fundamentales Heisenberg propuso basar la teoría cuántica “exclusivamente en relaciones entre cantidades que en principio fueran observables”⁴⁴⁶, entre magnitudes que se las pudiera medir a través de un procedimiento bien definido. El significado de muchos términos de la vida cotidiana y de la física clásica provenía de procedimientos que no se podían aplicar en la teoría cuántica. Así, por ejemplo, la distancia entre objetos constituía una noción creada por los primeros geómetras que se podía definir colocando una regla de medida entre ellos y contando cuantas veces podía ponerse —extremo a extremo— entre el primer y el segundo objeto. Generalizando esta experiencia fue posible definir una relación de esta naturaleza en el mundo macroscópico. Y sobre ella se formaron diferentes conceptos: longitud, posición, espacio, velocidad, trayectoria...⁴⁴⁷, que constituyeron las coordenadas mentales de nuestro pensamiento.

Estas coordenadas mentales, formadas para los fenómenos más grandes, que, por ser inmediatamente perceptibles a nuestros sentidos, constituyen nuestra experiencia común, están profundamente enraizadas en nuestros hábitos de pensamiento y “embalsamadas en nuestro lenguaje”⁴⁴⁸; pero estas coordenadas mentales no son adecuadas para los fenómenos más pequeños, que sólo son perceptibles a través de unos procedimientos experimentales que no permiten medir la distancia con precisión; el antiguo concepto de distancia y las nociones correlativas que se convirtieron en parte importante de nuestro subconsciente mental no están justificados para referirse a las partículas subatómicas, puesto que éstas sólo se pueden medir usando otras partículas que no puede evitarse que, al interferir con ellas, cambien las magnitudes que se pretenden medir. Mas nuestro lenguaje está construido con estos términos habituales y nos es muy difícil pensar en otros términos diferentes. De ahí surge el gran problema que representa el lenguaje en teoría cuántica. Bohr⁴⁴⁹ fue muy sensible a dicho problema y manifestó reiteradamente que el lenguaje habitual había sido construido para describir un conjunto de experiencias mucho más pobre del que

444M.Jammer, *The philosophy of Quantum Mechanics, Ibid.*, (p.58)

445W. Heisenberg (1927)

446W. Heisenberg (1925)

447F.A. Lindemann, *El significado físico de la teoría cuántica*, Clarendon Press, Oxford (1932), libro escrito con el objetivo de mostrar que el misterio que rodeaba a la mecánica cuántica y las dificultades que esta teoría presentaba en la época podían clarificarse con la adecuada comprensión de las relaciones de indeterminación de Heisenberg

448 F. A.Lindemann , *Ibid.*, (p.15)

449Ver apartado 3 del capítulo “La concepción filosófica de Bohr” de este trabajo

habíamos adquirido con los nuevos descubrimientos científicos.

Hemos visto que Heisenberg, en su artículo de 1925, en el que estableció las bases de la nueva mecánica cuántica, rechazó nociones utilizadas en la teoría cuántica anterior, como la posición, la órbita y el período de revolución del electrón en el átomo, porque al ser inobservables⁴⁵⁰, “les faltaba una evidente fundamentación física” y las reemplazó por nociones como las frecuencias de oscilación y las amplitudes, que determinan la intensidad de las líneas.”Al menos estas magnitudes sí podían ser observadas de forma directa”⁴⁵¹, escribió Heisenberg ⁴⁵². Hemos visto también que Heisenberg, en su artículo de 1927, en el que estableció sus relaciones de indeterminación, concluía que especular sobre la cuestión de si tras el mundo probabilístico que se percibe hay un mundo regido por la ley de la causalidad no tiene sentido y es inútil⁴⁵³, ya que la física sólo ha de describir las relaciones entre las observaciones.

Pero estas manifestaciones positivistas⁴⁵⁴ contrastan con el punto de partida del razonamiento que llevó a Heisenberg a las relaciones de indeterminación, el enunciado de Einstein de que sólo la teoría determina lo que puede observarse⁴⁵⁵. Efectivamente, Heisenberg pronto abandonó su actitud positivista⁴⁵⁶ e incluso adoptó una posición crítica con esta corriente de pensamiento. Precisamente esta misma actitud crítica es la que había manifestado Einstein en 1926 en la famosa conversación que había vivamente impresionado a Heisenberg. En dicha conversación Einstein había reprochado a Heisenberg que en su descripción matemática de la mecánica cuántica no aparecieran las órbitas de los electrones, puesto que le parecía absurdo “querer suprimir por completo las órbitas”⁴⁵⁷, si es posible verlas directamente en la cámara de niebla. Para Einstein si existían las trayectorias en el macrocosmos también habían de existir en el microcosmos. La noción de trayectoria no podía depender del tamaño del cuerpo —vemos que Einstein pretendía mantener las mismas nociones metafísicas de la física clásica en el microcosmos—.

450W.Heisenberg (1925), *Ibid.*, (p.261)

451W.Heisenberg, *La parte y el todo*, *Ibid.*, (p.85)

452No se podía observar la órbita de los electrones en los experimentos. Sólo se podía observar las fotografías de Wilson, que constituyen uno de los más importantes experimentos de la física cuántica.W. Heisenberg, *Principles of Quantum Theory* . *Ibid.*, (p.4)

453W. Heisenberg , *Ibid.*, (p.83)

454Para P.W. Bridgman (1936), que simpatizaba con el positivismo, las manifestaciones operacionalistas y positivistas eran simplemente “una clase de justificación filosófica para su éxito, es decir, de la mecánica de matrices, más ...que una parte indispensable en la formulación de la teoría”, según Jammer en *The philosophy of Quantum Mechanics*, *Ibid.*, (p58)

455Ver el apartado 3 de este capítulo

456M. Jammer ,*The philosophy of Quantum Mechanics*, *Ibid.*,(p.76)

457W. Heisenberg, *La parte y el todo*, *Ibid.*,(p 88)

Heisenberg se defendió siguiendo un criterio positivista y adujo que las órbitas de los electrones no se podían observar, ya que lo único que se podía registrar realmente eran frecuencias e intensidades de luz emitida por los átomos —vemos que Heisenberg aquí, contrariamente a Einstein, presupone diferentes nociones para el macrocosmos y para el microcosmos—. Si lo lógico era introducir en la teoría sólo magnitudes directamente observables, el concepto de órbita del electrón no podía aparecer en dicha teoría, adujo Heisenberg.

Pero Einstein respondió que cualquier teoría entrañaba magnitudes inobservables y el principio positivista que estaba defendiendo Heisenberg de sólo admitir magnitudes observables no se podía llevar de forma consecuente a la práctica. Heisenberg le replicó que él simplemente estaba utilizando la misma filosofía positivista⁴⁵⁸ que Einstein había utilizado en su teoría de la relatividad, a lo cual Einstein respondió⁴⁵⁹ :

Quizás he usado este tipo de filosofía, pero de todos modos es absurda. Dicho de manera más cauta, pienso que tal vez sea heurísticamente valioso acordarse de lo que se observa en realidad. Sin embargo, desde el punto de vista de los principios, es un error el querer basar una teoría exclusivamente en las magnitudes observables, pues en la realidad sucede justamente lo contrario. Sólo la teoría decide qué es lo que se puede observar. Verá usted, la observación es, en general, un proceso muy complejo.

Y Einstein continuó explicando cómo veía que se producía el proceso de la observación. El hecho que es observado origina unos acontecimientos en nuestro aparato de medida que provocan nuestra impresión. Entre el hecho y su fijación en nuestra conciencia hay un largo camino en el que actúan las leyes de la naturaleza. Por esta razón, cuando afirmamos que hemos observado algo estamos suponiendo que son correctas las leyes naturales que conocemos, por lo cual Einstein manifestó a Heisenberg que⁴⁶⁰:

Evidentemente, usted supone en su teoría que todo el mecanismo de las radiaciones de luz desde el átomo oscilante hasta el aparato espectral o hasta el ojo funciona exactamente igual como se había supuesto, es decir, según las leyes de Maxwell. Si ya no fuera así, no podría seguir observando las magnitudes que usted llama *observables*.

458 Al excluir nociones como el espacio y el tiempo absolutos porque no podían observarse y al usar una definición operacional de simultaneidad. D. Cassidy, *Ibid.*, (p. 239)

459 W. Heisenberg, *La parte y el todo*, *Ibid.*, (p. 89)

460 W. Heisenberg, *La parte y el todo*, *Ibid.*, (p. 90)

Hay que tener en cuenta⁴⁶¹ que este Einstein no era el que, en 1905, había defendido, al desarrollar la teoría especial de la relatividad, que la física sólo había de manejar observables, como Mach⁴⁶² había propuesto. El Einstein que estaba hablando con Heisenberg era el que, diez años antes, había desarrollado la teoría general de la relatividad y para ello había tenido que alejarse del pensamiento de Mach, por considerarlo excesivamente restrictivo; así, la teoría general de la relatividad contenía el concepto de campo, que no es observable en el mismo sentido que el espacio y el tiempo de la relatividad especial o las frecuencias que Heisenberg había utilizado en su artículo de 1925.

Aunque a Heisenberg le sorprendió la actitud de Einstein, sus argumentos le parecieron evidentes⁴⁶³ y encontramos, años después, su línea crítica en el mismo Heisenberg. Así en 1955⁴⁶⁴ Heisenberg manifestaba su aprecio por el espíritu crítico del positivismo moderno y consideraba que estaba justificado su postulado general de que si un determinado enunciado tiene sentido siempre hay que analizarlo detallada y críticamente— rememorando la proposición de Wittgenstein⁴⁶⁵:”Lo que se puede decir se puede decir claramente”. A través de la historia la sospecha de que un enunciado podía carecer de significado había sido muy útil porque había abierto la puerta a la posibilidad de nuevos conceptos; por ejemplo, la pregunta:”¿En qué órbita se mueven los electrones alrededor del núcleo?”⁴⁶⁶

La tesis positivista de que todo conocimiento está, en último término, basado en la experiencia había llevado a la exigencia de la clarificación lógica de cualquier enunciado de las ciencias naturales. No obstante, esta exigencia no se había podido satisfacer en la teoría cuántica, puesto que términos como “posición” y “velocidad” de un electrón, por ejemplo, no estaban claramente definidos en dicha teoría. Ello nos muestra que nunca podremos saber por anticipado cuáles son las limitaciones que se nos presentarán para aplicar nuestros conceptos cuando realicemos nuevos descubrimientos y ampliemos nuestros conocimientos. Y Heisenberg llegaba a declarar: ⁴⁶⁷“Por consiguiente, en el proceso de profundización nos vemos muchas veces obligados a emplear nuestros conceptos en una forma que no está justificada y que no tiene sentido”. Y, en consecuencia, insistir radicalmente en el postulado positivista de la necesidad de una clarificación lógica completa

461J.M. Sánchez Ron, *Ibid.*, (p.438)

462Ver el apartado “Giro de Einstein respecto al pensamiento de Mach” en el capítulo dedicado a la concepción filosófica de Einstein de este trabajo

463W.Heisenberg, *La parte y el todo*, *Ibid.* (p.90)

464En las conferencias Gifford, que posteriormente fueron editadas como *Física y filosofía*

465L.Wittgenstein *Ibid.* , prólogo (p 65)

466W.Heisenberg, *Física y filosofía*, *Ibid.*, (p.73)

467W.Heisenberg, *Física y filosofía*, *Ibid.*, (p.74)

de todos los enunciados haría la ciencia imposible. Finalmente Heisenberg concluía con un antiguo adagio: “Quien nunca quiera cometer un error ha de permanecer en silencio”, sentencia que podía interpretarse como la antítesis de la última proposición del *Tractatus*. Así, mientras el famoso enunciado de Wittgenstein invitaba a la cautela y a la parquedad, este viejo proverbio citado por Heisenber invitaba a la creación y a la invención.

La visión que del positivismo tenía Heisenberg se muestra⁴⁶⁸ también en una conversación que mantuvo con W.Pauli en 1952, después de un conferencia que se realizó en Copenhague para restablecer las relaciones entre científicos de todo el mundo y tratar de la construcción de un gran acelerador en Europa. A la conferencia asistieron muchos positivistas, que no mostraron ninguna oposición a la mecánica cuántica, en contra de lo que esperaban Heisenberg y Pauli. Según este último, ello fue debido al hecho de que los positivistas veían que la mecánica cuántica describía correctamente los fenómenos cuánticos y para los positivistas no había nada más allá de los fenómenos, pues mantenían, como Wittgenstein⁴⁶⁹, que “el mundo es todo lo que sucede” y “el mundo es la totalidad de los hechos, no de las cosas”. En cambio, los positivistas no aceptaban nociones añadidas por los físicos a los hechos cuánticos, como la complementariedad y las relaciones de indeterminación que consideraban que eran un⁴⁷⁰ “complemento lírico poco claro, un retroceso al pensamiento precientífico, en resumen, pura palabrería”.

Para los positivistas, según Heisenberg, comprender equivalía a poder pronosticar. En cambio, para él había una gran diferencia entre ambos conceptos y para explicarla ofreció la siguiente imagen⁴⁷¹:

Cuando vemos un avión en el cielo podemos calcular con relativa certeza dónde estará un segundo después. Tan solo hay que seguir la trayectoria en línea recta; si advertimos que el avión traza una curva, podemos incluir esta curvatura en nuestro cálculo. Lo más probable es que acertemos en la mayor parte de los casos. Pero eso no quiere decir que hayamos comprendido la trayectoria, pues esto sólo es posible si hablamos previamente con el piloto y éste nos informa sobre el vuelo que va a realizar

Cuando Pauli preguntó a Heisenberg qué quería decir con esta comparación y qué se correspondía en la ciencia de la naturaleza con la intención del piloto, Heisenberg respondió con otra

468W.Heisenberg, *La parte y el todo*, *Ibid.* (p.265)

469L.Wittgenstein, *Tractatus logico-philosophicus*, *Ibid.* (p. 67)

470W.Heisenberg, *La parte y el todo*, *Ibid.*(p. 266)

471W.Heisenberg, *La parte y el todo*, *Ibid.* (p.266)

comparación: la astronomía de Ptolomeo y la teoría del movimiento de los planetas de Newton. Según el criterio de verdad del pronóstico, la 1ª no es inferior a la 2ª, pero a todos nos parece más correcta la 2ª que la 1ª, porque, según Heisenberg, Newton “describió la intención según la cual está construida la naturaleza”. Así, para Heisenberg las leyes fundamentales son elementos significativos del plan según el cual está ordenada la naturaleza y se puede plantear la cuestión de si detrás de dichas leyes hay una conciencia, cuya intención revelan estas leyes. Dirían los positivistas, según Heisenberg, que esta pregunta no ha de plantearse, porque no tiene un significado claro. Para los positivistas hay que dividir el mundo entre lo que se puede decir con claridad y lo que se debe callar. “Por tanto—escribía Heisenberg— aquí tendríamos que callarnos. Pero no hay filosofía tan carente de sentido como ésta, porque no hay casi nada que se pueda expresar claramente. Si se elimina todo lo oscuro, probablemente sólo nos quedarían algunas tautologías absolutamente faltas de interés”. Si el ser humano se limitara a estudiar lo que es sencillo, se dejaría muchos temas interesantes para estudiar, precisamente aquellos de los cuales los positivistas prohíben hablar. Así pues, en síntesis, se puede decir que Heisenberg aceptaba de los positivistas sus exigencias de precisión y claridad, pero no sus restricciones y prohibiciones.

8. EL REALISMO “PRÁCTICO” DE HEISENBERG

¿ Por qué físicos eminentes como Einstein no aceptaban la interpretación de Bohr y Heisenberg de la mecánica cuántica? La respuesta que Heisenberg⁴⁷² daba a esta pregunta que a menudo se planteaba era que Einstein veía la interpretación de Copenhague —que Heisenberg consideraba la “interpretación de la teoría cuántica”— desde el punto de vista de lo que él llamaba realismo “dogmático”. Este era uno de los tres tipos de realismo que Heisenberg distinguía, a los cuales denominaba realismo “dogmático”, realismo “práctico” y realismo “metafísico”. En primer lugar, con el término realismo “dogmático” Heisenberg entendía la doctrina según la cual no hay enunciados referidos al mundo material que no puedan ser “objetivados” y consideraba que un enunciado era “objetivado” si se aceptaba que “su contenido no dependía de las condiciones bajo las cuales podía ser verificado”. Es decir, según Heisenberg, los realistas “dogmáticos” creen que se puede conseguir que todos los enunciados que se refieren a la naturaleza física no dependan de las condiciones en las que puedan comprobarse.

En cambio, según el realismo que Heisenberg llamaba “práctico”, hay “enunciados que pueden ser

⁴⁷²W.Heisenberg, *Física y Filosofía*, *Ibid.* (p. 62)

objetivados” —pero no son todos—y los que pueden objetivarse constituyen la mayoría de los enunciados de nuestra vida diaria y una parte fundamental de la ciencia natural. “El realismo práctico ha sido y será siempre parte esencial de la ciencia natural”⁴⁷³. Por otra parte, el realismo dogmático ha sido un supuesto esencial de la física clásica. Heisenberg comprende que Einstein acepte el realismo dogmático propio de la física clásica, porque todo investigador científico “siente que está buscando algo que es objetivamente verdadero”⁴⁷⁴, absoluta e incondicionalmente cierto, los juicios respecto a lo cual no estén sujetos a condiciones bajo las cuales pueden ser verificados. Para el científico la existencia de la realidad es un supuesto que intuye —emocionalmente—, que ve de forma evidente⁴⁷⁵.

Pero el realismo dogmático, que había constituido una condición necesaria de la física clásica, no constituía una condición necesaria de toda la ciencia, porque la mecánica cuántica mostraba que era posible explicar la naturaleza por medio de simples leyes matemáticas, aunque fueran estadísticas, sin la base del realismo dogmático, es decir, aceptando que el contenido de sus enunciados sí dependía de las condiciones bajo las cuales podían ser verificados. Así pues, la mecánica cuántica constituía una prueba de que también es posible la ciencia sin el supuesto del realismo dogmático, de que los físicos no requieren el realismo dogmático para elaborar una teoría matemática que prediga con éxito la realidad que se va a observar. Sólo requieren de un realismo práctico.

Finalmente, el tercer realismo que distinguía Heisenberg, el realismo “metafísico”, iba, según Heisenberg, un paso más allá del realismo “dogmático”, porque, según el realismo metafísico las cosas existen realmente. Así, la diferencia entre el realismo dogmático y el metafísico radica en el concepto de “existencia”, en la idea de que el segundo acepta que el mundo material existe. Aunque Heisenberg no lo manifieste explícitamente, la diferencia que permite entrever entre su noción de realistas dogmáticos y su noción de realistas metafísicos es que los primeros no se comprometen a aceptar la existencia del mundo como hacen los segundos; sin embargo, los realistas dogmáticos, según Heisenberg, aceptan la posibilidad de que todos los enunciados referidos al mundo sean independientes de sus condiciones de confirmación, es decir, se refieran al objeto sin depender de la perturbación provocada por el instrumento de observación.

473W.Heisenberg, *Física y Filosofía*, *Ibid.* (p. 62)

474W.Heisenberg, *Física y Filosofía*, *Ibid.* (p. 62)

475Como los supuestos implícitos aceptados de forma acrítica y apasionada, los “themata” de G.Holton en *Ensayos sobre el pensamiento científico en la época de Einstein*, Alianza Editorial, Madrid (1982)

El realismo metafísico, según Heisenberg, provenía de Descartes, quien, después de dividir los seres creados por Dios en *res cogitans* y *res extensa*, substancias con atributos radicalmente diferentes, demostró la existencia de la 2ª con el argumento de que Dios, ya que es omnisciente e infinitamente bondadoso, no podía habernos engañado cuando pensamos que nuestras ideas del mundo material —de la *res extensa*— provienen del mundo material; por tanto, infería Descartes, el mundo material existe.

El realismo metafísico presentaba, para Heisenberg, muchas dificultades, como el uso elemental e ingenuo que hace del término “existencia”. Estas dificultades constituyeron, según Heisenberg, el punto de partida de la filosofía empirista, dentro de la cual destacaba —por la consistencia de sus argumentos— Berkeley, quien argumentaba que si todo nuestro conocimiento deriva de la percepción no tiene significado el enunciado de que las cosas existen, porque si las percepciones son todo lo que tenemos los seres humanos no se puede establecer ninguna diferencia entre decir que las cosas existen y decir que no existen. Por tanto, ser percibido es existir. Hume siguió esta línea de pensamiento y la llevó a conclusiones escépticas, como el enunciado de que no se puede saber qué hay detrás de las percepciones, si existe la realidad material que parece que muestran o no existe. También Hume llegó a negar la causalidad, argumentando que no se percibe el nexo que establecemos como necesario entre causa y efecto. La línea de este pensamiento empirista continuó en el positivismo. Y Heisenberg fue, al comienzo de su carrera, positivista.

9. CONCLUSIÓN DEL CAPÍTULO

Aunque Heisenberg había manifestado que su motivación heurística era filosófica, porque ante todo quería entender los hechos que percibía, la actividad a la que básicamente —hemos visto— él dedicó sus esfuerzos no fue el desarrollo de sus concepciones filosóficas, sino el desarrollo formal de la fundamentación de la mecánica cuántica, campo en el cual realizó una significativa aportación. Fue con la aparición de la interpretación de Copenhague, que nació⁴⁷⁶ con el artículo de Heisenberg de 1927, que empezaron las sistemáticas manifestaciones filosóficas — en las que se percibe la profunda influencia de Bohr⁴⁷⁷— a través de las cuales Heisenberg divulgaba las revolucionarias conclusiones de la nueva mecánica cuántica. Dichas manifestaciones tuvieron en

⁴⁷⁶Según D.Cassidy, *Ibid.*, (p.255)

⁴⁷⁷Fue con Bohr que Heisenberg adquirió un carácter filosófico. Antes de penetrar en su órbita de influencia, el joven Heisenberg era un físico dedicado completamente a solventar técnicamente problemas de física atómica con el instrumental formal matemático

general buena acogida entre el amplio público al que iban dirigidas, puesto que se adaptaban a las características del pensamiento dominante en la sociedad germánica de la época.

Hemos visto que la concepción filosófica de Heisenberg sufrió una evolución a lo largo de su carrera. Así pues, Heisenberg empezó mostrándose como positivista, porque declaraba que sólo estaba dispuesto a aceptar magnitudes observables, pero posteriormente, como Einstein también había hecho, rechazó el positivismo por considerar que limitaba la creación científica. Y Heisenberg, como físico, necesitaba unas concepciones filosóficas que favorecieran el progreso de la investigación científica. Así también a Heisenberg, como a Einstein, se le puede considerar platónico y pitagórico, puesto que estaba convencido de que la tarea del físico consiste esencialmente en buscar las estructuras abstractas que, en el fondo, rigen el mundo que percibimos. Hemos visto, además, que Heisenberg se declaraba realista, como Einstein. Pero el realismo de aquél es más moderado, más cauteloso, más prudente, que el de éste, puesto que, según Heisenberg, hay algunos juicios que se pueden objetivar, es decir, hay enunciados cuyo contenido no depende de las circunstancias bajo las cuales se verifican pero no todos los juicios cumplen esta condición. A pesar de su precaución, Heisenberg necesitaba presuponer que hay proposiciones cuyo contenido es objetivo, pues este supuesto es muy útil para que el científico se sienta emocionalmente motivado para ser capaz de desarrollar satisfactoriamente su actividad investigadora— por eso Heisenberg calificaba su realismo de “práctico”. En cambio, el realismo de Einstein, según Heisenberg, era “dogmático”, puesto que suponía que son absolutamente todas las proposiciones referidas al mundo material las que tienen un contenido objetivo. Esta era una de las principales diferencias que mantenían a Einstein y a Heisenberg en posiciones enfrentadas del famoso debate que protagonizaron Einstein y Bohr.

Mas también hemos encontrado pensamientos de un bando en el otro, puesto que en ocasiones las ideas cruzaban las líneas del enfrentamiento. Así, hemos visto que Heisenberg no siempre mantuvo posturas unitarias durante toda su vida. Por ejemplo, llegó a aceptar una causalidad restringida⁴⁷⁸, lo cual le acercaría a la postura defendida por Einstein. Y es que Heisenberg mostró, como Einstein y Bohr, y como otros de los creadores de la mecánica cuántica, los grandes retos conceptuales que lanzaba la nueva teoría, las luces y las sombras de una teoría que presentaba éxitos científicos pero también desconcertantes implicaciones filosóficas.

478Ver los últimos párrafos del apartado “La relación de causalidad” de este capítulo.

CAPÍTULO 3. La concepción filosófica de Einstein

ÍNDICE DEL CAPÍTULO

1	Introducción del capítulo.....	184
2	El progreso de la física como triunfo del credo realista	184
3	Giro de Einstein respecto al pensamiento de Mach.....	187
4	Actitud de Einstein ante la metafísica.....	190
5	Razón y experiencia sensorial.....	193
6	La noción de realidad física en EPR.....	196
7	Características del realismo de Einstein.....	203
8	El peculiar realismo de Einstein.....	208
9	Conclusión del capítulo.....	216

1. INTRODUCCIÓN DEL CAPÍTULO

El realismo es esencial en el pensamiento de Einstein (1879-1955) en su madurez, pero aunque no hay ninguna duda sobre el giro que realizó del positivismo de Mach al realismo⁴⁷⁹ y sobre el papel fundamental que desempeñó el realismo en su crítica a la teoría cuántica, en cambio, no hay acuerdo entre los especialistas sobre qué implicaba exactamente el realismo de Einstein porque, a pesar de las numerosas, aunque breves, referencias a esta concepción que aparecen en las obras de Einstein, éste nunca expuso de manera sistemática sus ideas al respecto. Así pues, el realismo es clave para entender la forma de pensar de Einstein y la influencia que ha ejercido en nuestra cultura pero sólo se le pueden encontrar notas dispersas en las que a este tema se refiere; una de las más claras, sucintas y representativas es la siguiente⁴⁸⁰: “La física es un intento conceptual de captar la realidad tal como es pensada independientemente de que sea observada. En este sentido se habla de 'realidad física'”.⁴⁸¹ Estas palabras recogen, como vamos a ver, el núcleo substancial del realismo que Einstein defendió reiteradamente.

2. EL PROGRESO DE LA FISICA COMO TRIUNFO DEL CREDO REALISTA

Einstein contemplaba el avance de la física a través de la historia como un triunfo del credo realista, como lo muestra su ensayo sobre Maxwell, publicado en 1931, y el libro que escribió con Infeld, publicado en 1938 y titulado “La evolución de la física”. El realismo subyace a lo largo de todas las páginas de los dos trabajos, que resumen el desarrollo histórico de la física. Así *La influencia de Maxwell en el desarrollo de la realidad física* se inicia con estas palabras⁴⁸²: “La creencia en un

479La relación entre Einstein y Mach ha sido estudiada detalladamente por Holton, quien la divide en cuatro etapas: la aceptación inicial de las características fundamentales de la doctrina de Mach; la correspondencia y encuentro entre Einstein y Mach; la revelación del inesperado ataque de Mach a la teoría de la relatividad de Einstein y el desarrollo posterior por Einstein de una filosofía del conocimiento en la que rechazaba muchas de las creencias machianas. G.Holton, *Ensayos sobre el pensamiento científico en la época de Einstein*, Alianza Universidad, Madrid (1982), (p. 175)

480 “*Physics is an attempt conceptually to grasp reality as it is thought independently of its being observed. In this sense one speaks of 'physical reality'.*” A.Einstein, “Autobiographical Notes”. Schilpp (1949) (p.81)

481 “Realidad” para Einstein significa sólo “realidad física”. Como señala A.Fine en *The Shake Game. Einstein Realism and the Quantum Theory*, el monismo es una característica del realismo de Einstein, quien no consideraba satisfactorio aceptar que hay más de una categoría de objetos reales, por ejemplo, partículas puntuales y campos continuos. Su programa para construir una teoría del campo unificado se basaba en la realización de este ideal . Su actitud reduccionista hacia la psicología también se deriva de este monismo, que enlaza con el de Spinoza, a quien Einstein reverenciaba y de quien se declaraba discípulo. En sus propias palabras: “Cuerpo y alma no son dos cosas diferentes, sino sólo dos maneras diferentes de percibir la misma cosa. Similarmente, física y psicología son sólo dos intentos diferentes de enlazar nuestra experiencia a través de un pensamiento sistemático”, citado en A.Fine , *Ibid.*, p.204, de Dukas y Hoffman (1979).

482A.Einstein, *La influencia de Maxwell en el desarrollo de la concepción de lo físico-real*. Editores Tusquets. Barcelona (1986)

mundo exterior independiente de los objetos percibidos está en la base de todas las ciencias de la naturaleza” y en *La evolución de la física* sus autores manifiestan⁴⁸³:

En ciencia todas las ideas esenciales han surgido de un conflicto dramático entre la realidad y nuestros esfuerzos por comprenderla [. . .] Mediante las teorías físicas nos esforzamos por abrirnos paso a través de la confusión de los hechos observados para ordenar y comprender el mundo de nuestras impresiones sensibles. Deseamos que los hechos observados encajen con nuestra concepción de la realidad. Sin la creencia de que es posible captar la realidad con nuestras construcciones teóricas, sin la creencia en la armonía interior de nuestro mundo, la ciencia sería imposible.

En las últimas palabras vemos que Einstein e Infeld consideraban el realismo⁴⁸⁴ como una creencia que, psicológicamente, cumplía una importante función en el desarrollo de la investigación: motivar al científico para que, a pesar de las dificultades, no cesara en su empeño de pensar cómo resolver los enigmas que la realidad le planteaba. La imagen mental de que, tras la apariencia desconcertante y desordenada de los fenómenos inmediatos, había una realidad oculta que estaba esperando ser desvelada y entendida por el científico constituía un estímulo que generaba el entusiasmo que el investigador necesitaba.

Sin embargo, en otros pasajes de “La evolución de la física” no se habla de que el científico intente captar o comprender la realidad sino de que es él quien la crea. Entonces por “realidad” los autores entienden las nociones que, para comprender el mundo, inventa el científico, para quien⁴⁸⁵ las construcciones de su imaginación parecen tan necesarias y naturales que no puede tratarlas como creaciones de su pensamiento sino como realidades dadas”. Ya que el mundo en sí es incognoscible, nuestros conceptos constituyen nuestro mundo, nuestra realidad⁴⁸⁶. Así teoría y realidad se confunden. Cuando explicamos la realidad con un determinado sistema conceptual, consideramos, inconscientemente, que éste se adapta tan bien a aquélla que presuponemos que dicho sistema conceptual constituye la misma realidad. Vemos la realidad según unos conceptos que nos la hacen

483A. Einstein y L. Infeld, *L'evolució de la física*. Edicions 62. Barcelona (1984) (p.214 y p.236)

484 En una nota a pie de página, Fine, en *Ibid.*, (p.89), manifiesta que en la correspondencia con Solovine, Einstein señaló que el libro fue escrito con el objetivo de obtener ingresos para Infeld y destacar la función de la epistemología realista en la historia de la física, es decir, como un antídoto a la creciente oleada de positivismo.

485A. Einstein, “On the Method of Theoretical Physics”, *Philosophy of Science*, Vol. 1, No. 2 (Abril de 1934) (p.163-169)

486 Aquí Einstein nos sorprende con esta aparente contradicción respecto a su anterior concepción. Utiliza el término “realidad” con diferente significado, puesto que aquí la realidad no es lo que el ser humano comprende, independientemente de que sea o no sea observado; aquí la realidad es el sistema de nociones con las que el ser humano comprende la experiencia. Lo que Einstein sugiere es que el ser humano se siente tan seguro con su sistema de nociones que olvida que es creación suya y lo ve como si fuera la realidad externa.

inteligible de forma que no podemos distinguirla de ellos. En palabras de los autores⁴⁸⁷:

Hemos visto cómo el progreso de la física creaba nuevas realidades. Esta cadena de la actividad creadora proviene de mucho antes del nacimiento de la física. Uno de los conceptos más primitivos es el de objeto. Los conceptos de árbol, de caballo o de cualquier cuerpo material son creaciones obtenidas sobre la base de la experiencia [...] Un gato que juega con un ratón también crea, con el pensamiento, su propia realidad primitiva. El hecho de que el gato reaccione siempre de la misma manera hacia cualquier ratón demuestra que forma conceptos y teorías que lo guían a través de su propio mundo de impresiones.

Continúan los autores ofreciendo ejemplos de conceptos que el ser humano ha creado con su pensamiento para entender el mundo que percibe, como el concepto de número y el de tiempo; siglos después de la aparición de estos conceptos el hombre se ha acostumbrado de tal manera a ellos que ya constituyen su mundo y se identifican con la misma realidad. Con los conceptos de masa, de fuerza y de sistema de inercia, que los autores califican de “libres invenciones”, nació la física. De ellos Einstein e Infeld escriben⁴⁸⁸:

Han llevado a la formulación del punto de vista mecánico. Para el físico de principios del siglo XIX, la realidad de nuestro mundo exterior consistía en partículas y en fuerzas simples que actúan entre las primeras. Creían que podían explicar todos los fenómenos de la Naturaleza por medio de estos conceptos. Pero las dificultades relacionadas con la aguja imantada y las relacionadas con la estructura del éter nos han llevado a crear una realidad más sutil. Aparece la importante invención del campo electromagnético.

De esta forma, los autores recuerdan, aludiendo a la teoría de la relatividad, que, gracias a la audaz imaginación científica, se han inventado nuevos conceptos, como el continuum quadridimensional temporal y espacial, que ha reemplazado el tiempo unidimensional y el espacio tridimensional. Y, refiriéndose posteriormente a la teoría cuántica, Einstein e Infeld también señalan que esta teoría ha creado a su vez características nuevas y esenciales de nuestra realidad, porque con esta teoría la discontinuidad ha substituído la continuidad y han aparecido leyes de probabilidad allí donde regían leyes para individuos. Así pues, la realidad creada por la física moderna se encuentra muy lejos de la de los primeros tiempos de la ciencia, pero el objetivo de toda teoría física continua

487A. Einstein y L. Infeld, *Ibid.* (p.234)

488 *Ibid.* (p.235)

siendo el mismo.

3. GIRO DE EINSTEIN RESPECTO AL PENSAMIENTO DE MACH

Admiración, respeto y gratitud mostró Einstein en el ensayo que escribió en 1916 y fue publicado como obituario de Mach; en este escrito manifestó que en su juventud se había apoyado en gran medida⁴⁸⁹ en el pensamiento positivista de este autor⁴⁹⁰: “Puedo decir con certeza que el estudio de Mach y Hume ha sido directa e indirectamente una gran ayuda en mi trabajo [...] Mach reconoció los puntos débiles de la mecánica clásica y no estuvo muy lejos de demandar una teoría general de la relatividad ¡hace medio siglo!” Unos de estos puntos débiles eran las nociones newtonianas de espacio absoluto y movimiento absoluto.”Para mí sólo existe el movimiento relativo”, había escrito Mach⁴⁹¹. Además, el requisito positivista de Mach, por el cual cada proposición en física ha de enunciar directamente relaciones entre cantidades observables, también fue de un gran valor heurístico para que Einstein llegara a establecer nociones como la de simultaneidad en la teoría especial de la relatividad.

Pero más tarde, con la teoría general de la relatividad, Einstein cambió radicalmente de actitud respecto al pensamiento de Mach; de ahí que en su autobiografía escribiera⁴⁹²: “Veo la grandeza de Mach en su incorruptible escepticismo y en su independencia; en mi juventud, sin embargo, la posición epistemológica de Mach también me influyó muchísimo, una posición que ahora me parece esencialmente inaceptable”. Einstein rechazó la filosofía de Mach cuando, desarrollando la teoría general de la relatividad⁴⁹³, comprendió que el requisito positivista de éste constituía una simplificación excesiva, puesto que los enunciados generales de dicha teoría eran relaciones entre símbolos que se encontraban muy alejadas de las observaciones empíricas. Para Mach los principios fundamentales de una teoría habían de constar de conceptos que estuvieran muy cerca de las observaciones directas. El camino que va desde éstas hasta aquéllos había de ser breve y fácilmente

489Así, la crítica efectuada por Mach a la noción newtoniana de espacio absoluto fue punto de partida para la teoría de la relatividad, puesto que, según Mach, esta noción es un “concepto patológico”, ya que es “una pura construcción mental que no se puede encontrar en la experiencia”. G. Holton, *Ibid.* (p.167)

490Según cita P.Frank en “Einstein, Mach y el positivismo lógico” Schilpp (1949), *Ibid.*(p.272)

491Según cita A. Pais en *El Señor es sutil...La ciencia y la vida de Albert Einstein*. Ariel, Barcelona (1984) (p.286)

492 A. Einstein, “Autobiographical Notes” Schilpp (1949),(p.21)

493Refiriéndose al período alrededor de 1905, Einstein escribió: “En esa época mi modo de pensar estaba mucho más cerca del positivismo de lo que estubo más tarde...mi alejamiento del positivismo se dió sólo cuando trabajaba en la teoría general de la relatividad”. Es una cita de una carta a D.S. Mackey, según A.Fine en *The Shaky Game. Einstein Realism and the Quantum Theory*. The University of Chicago Press, Chicago y Londres,1986 (p.86)

inteligible. En cambio, para Einstein era largo y difícil. En sus propias palabras⁴⁹⁴:

la distancia en el pensamiento entre los conceptos y las leyes fundamentales por un lado y, por otro, las conclusiones que se han de extraer en relación a nuestra experiencia crece más y más cuanto más simple es la estructura lógica, es decir, cuanto más reducido es el número de elementos conceptuales lógicamente independientes que se consideren necesarios para sostener la estructura [...] Es el gran objeto de toda teoría hacer estos elementos irreducibles tan simples y escasos en número como sea posible, sin renunciar a la adecuada representación de cualquier contenido empírico.

Para Einstein los principios fundamentales habían de cumplir dos requisitos, uno lógico y otro empírico; el primero exigía consistencia y simplicidad y el segundo exigía acuerdo con los hechos observados. Por ello el camino que enlazaba los hechos observados con los principios fundamentales no podía ser sencillo.

Una muestra del cambio de actitud que Einstein experimentó ante el pensamiento de Mach es una de sus primeras críticas, expresada en una carta a su amigo Besso escrita en 1917, con estas palabras: “En cuanto a Mach [...] no puede crear nada vivo, puede solamente eliminar lo que hay de podrido”⁴⁹⁵. Posteriormente, en 1922, ante una reunión de filósofos Einstein manifestó⁴⁹⁶:

El sistema de Mach estudia las relaciones existentes entre datos de la experiencia; según Mach, la ciencia es la totalidad de estas relaciones. Es ése un punto de vista erróneo y, de hecho, lo que Mach ha hecho es un catálogo, no un sistema. Mach era tan bueno en mecánica como malo en filosofía. Este miope punto de vista sobre la ciencia le condujo a rechazar la existencia de los átomos.

Y, muchos años después, en 1948, en una carta también dirigida a Besso, escribió⁴⁹⁷:

En lo que se refiere a Mach [...] su gran mérito es haber flexibilizado el dogmatismo que reinaba en los siglos XVIII y XIX sobre los fundamentos de la física. Trató de mostrar, sobre todo en la mecánica [...] cómo los conceptos han nacido de la experiencia [...] Yo veo su punto débil en el hecho de que creía

494A. Einstein, “On the Methods of Theoretical Physics”, *Philosophy of Science*, Vol.1, No. 2 (Abril de 1934), (p.163-169)

495A. Einstein, *Correspondencia con Michele Besso*, Tusquets Editores, Barcelona (1994) (p.154)

496Según cita A. Pais en *El Señor es sutil...La ciencia y la vida de Albert Einstein*. Edit. Ariel. Barcelona (1984) (p.287)

497A. Einstein, *Correspondencia con Michele Besso*, Tusquets Editores, Barcelona (1994) (p.353)

poco más o menos que la ciencia consistía en poner orden en el material experimental, es decir, que ignoró el elemento constructivo libre en la elaboración de un concepto.

Durante el resto de su vida Einstein continuó admirando la mecánica de Mach pero criticando su filosofía; así, poco antes de su muerte⁴⁹⁸:

Einstein dijo que siempre había creído que la invención de conceptos científicos y la construcción de teorías sobre ellos era una de las propiedades creadoras de la mente humana. Su propio punto de vista era así opuesto al de Mach, porque Mach suponía que las leyes de la ciencia eran sólo una manera económica de describir una gran colección de hechos.

Fine⁴⁹⁹ llama la atención sobre el hecho de que la crítica que presentó Einstein contra Mach es anterior al desarrollo de la teoría cuántica. Einstein calificó la evolución de la teoría cuántica que se dió entre 1925 y 1927 de ⁵⁰⁰ “positivista estéril”, reprochándole que sólo ofreciera recursos para coordinar los resultados de los experimentos concebibles. La crítica de Einstein a la interpretación dominante de la teoría cuántica surgió de su posición realista; por eso él se refirió a los teóricos cuánticos que aceptaban dicha interpretación como⁵⁰¹ “una orgía embriagada de teoría del conocimiento” que estaban jugando un ⁵⁰²“arriesgado juego...con la realidad”.

Al contemplar la teoría cuántica, Einstein tenía en mente la imagen de una clase de teoría no realista —alguna versión del catálogo de Mach—, que contrastaba con la imagen de una clase de teoría realista. Mientras la segunda enlazaba los datos observados mediante un sistema conceptual, la primera sólo los coordinaba, aunque ello no le impidiera realizar predicciones con éxito. Y Einstein, al interpretar las fórmulas probabilísticas de la cuántica como simples constructos que permitían calcular las probabilidades de los resultados de las observaciones —no para conocer lo que existía independientemente de las observaciones—, extendía el no realismo a la teoría cuántica.

En síntesis, como hemos visto, aunque en un principio Einstein se inspiró en el pensamiento

498Según cita A. Pais en *Ibid.* (p.287)

499A.Fine, *The Shaky Game. Relism and the Quantum Theory*. The University of Chicago Press. Chicago y Londres. (1986)

500Según cita Fine en *Ibid.* (p.94) de Einstein (1953b) (p.33)

501 “*erkenntnistheorie-getränke Orgie*” según cita Fine en *Ibid.* de una carta de Einstein a Schrödinger del 17 de junio de 1935

502Según cita Fine en *Ibid.* de una carta de Einstein a Schrödinger del 22 de diciembre de 1950

fenomenista de Mach y siempre conservó trazas de epistemología positivista, posteriormente, en su madurez, atrincherado en su posición realista, lo atacó vehemente y reiteradamente⁵⁰³.

4. ACTITUD DE EINSTEIN ANTE LA METAFISICA

A pesar del interés que Einstein mostró repetidamente por las tradicionales cuestiones metafísicas, pocas líneas se le pueden encontrar que sean relevantes para responderlas⁵⁰⁴ de una manera original, exhaustiva y sistemática, es decir, con la misma profundidad con la que trató los problemas físicos que estudió. Einstein, como muchos físicos contemporáneos, evitó la ontología, posiblemente por el carácter especulativo de esta materia, cuyos enunciados no se pueden comprobar empíricamente ni demostrar matemáticamente. Así Einstein se interesó por las preguntas filosóficas pero muchas veces no se atrevió a darles una respuesta, como manifestó cuando escribió sobre el significado de los términos “realidad” y “comprender”⁵⁰⁵: “Tras los incansables esfuerzos del investigador acecha una motivación más fuerte y más misteriosa: la existencia y la realidad que desea comprender. Pero él retrocede ante el uso de tales palabras, porque entra en dificultades al intentar explicar qué significa realmente 'realidad' y 'comprender'”.

Es interesante fijarse en el uso que hizo Einstein del término *metafísica*, pues llama la atención que en unas ocasiones le dé un sentido peyorativo y en otras considere que expresa una noción valiosa. En las primeras se ve a Einstein cercano a Mach; en las segundas se le encuentra muy alejado de él. Así, al representar la estructura lógica de sus teorías, Einstein se mostraba en la línea del positivismo metodológico, pues escribía⁵⁰⁶:

Para que el pensamiento no degenera en “metafísica”, o en conversación vacía, tan sólo es necesario que suficiente número de proposiciones del sistema conceptual estén firme y suficientemente bien conectadas con la experiencia sensorial y que el sistema conceptual, ante su tarea de ordenar y examinar

503Según Popper, Einstein en su madurez, había lamentado profundamente que él mismo en su juventud había contribuido a la extensión en Alemania de la actitud positivista e idealista que Mach compartía con Berkeley porque dicha actitud había provocado la intrusión del subjetivismo en física, especialmente en la mecánica cuántica. K.Popper. *Teoría cuántica y el cisma en Física*. Tecnos. Madrid (2011) (p.25)

504Según Margenau en “Einstein's Conception of Reality”, Schilpp (1949) (p.248)

505Según cita de H.Margenau en “Einstein's Conception of Reality” Schilpp (1949) (p.249) de un discurso de Einstein en la Universidad de Columbia en 1932. H.Margenau (1901-1997) destacó, como físico, en la investigación de la teoría de microondas y de las fuerzas intermoleculares y, como filósofo de la ciencia, se dedicó especialmente al tema del indeterminismo en la física cuántica y la libertad humana.

506Según cita que extrajo P.Frank en “Einstein, Mach y el positivismo lógico”(1949), (p.279)de A.Einstein en “Remarks on Bertrand Russell's Theory of Knowledge” (1944). P.Frank fue uno de los fundadores del Círculo de Viena.

la experiencia que nos ofrecen los sentidos, muestre tanta unidad y concisión como sea posible.

Aquí Einstein usaba “metafísica” en exactamente el mismo sentido que los filósofos positivistas, refiriéndose a ella como un conjunto de principios de los cuales no se pueden inferir enunciados sobre posibles experiencias de los sentidos.

En cambio, en otro pasaje⁵⁰⁷ Einstein hablaba del “‘funesto' miedo a la metafísica [...] que se ha convertido en una enfermedad de la filosofía empirista contemporánea”. Lo decía después de manifestar su desacuerdo con la creencia de “que todos aquellos conceptos y proposiciones que no se puedan deducir de la materia prima sensorial, se han de apartar, por su carácter 'metafísico', del pensamiento”.

Aquí Einstein llamaba “metafísica” a toda noción que no se pudiera extraer directamente de la primera experiencia que nos ofrecen los sentidos. Ahora bien, los positivistas lógicos del siglo XX no rechazaban este tipo de nociones. En ello se distinguían de los positivistas del siglo XIX, entre los que Mach se encontraba. Y por ello P. Frank⁵⁰⁸ consideraba que Einstein, en su madurez, aunque se encontraba alejado del positivismo de Mach, se hallaba cerca del positivismo lógico.

Estas dos acepciones con las que Einstein usó el término “metafísica” se pueden relacionar con dos opiniones que manifestó respecto a la filosofía de Kant, que había estudiado desde la adolescencia⁵⁰⁹. Por una parte, Einstein, como Kant, no consideraba que la metafísica pudiera ser una ciencia. Creía que hay una “cosa en sí” (*Ding an sich*) incognoscible y sintetizaba el valor del pensamiento kantiano en la siguiente sentencia⁵¹⁰: “Lo real no nos es dado, pero nos es presentado (*aufgegeben*) como un enigma”, a la que atribuía el siguiente significado: “Hay un modelo conceptual para la comprensión de lo interpersonal, cuya autoridad se basa sólo en su verificación. Este modelo conceptual se refiere precisamente a lo 'real' (por definición) y cada pregunta que se refiera a 'la naturaleza de lo real' (por definición) aparece vacía”. Así pues, según Einstein, las cuestiones que tratan de la realidad en sí no pueden responderse porque aluden a una entidad que no podemos conocer y las respuestas que les demos nunca podrán ser contrastadas, porque para él,

507A.Einstein “Bertrand Russell y el pensamiento filosófico”, publicado en 1946 en “Library of Living Philosophes”

Schilpp. En español está en *Mi visión del mundo*, Tusquets Editores (1986)

508P.Frank, “Einstein, Mach y el positivismo lógico” Schilpp (1949)

509A.País, *Ibid.* (p.28)

510A.Einstein, “Reply to criticisms”, Schilpp (1949),(p.680)

como⁵¹¹ para Kant, “Todo conocimiento de la realidad empieza con la experiencia y termina con ella” —Aquí Einstein, al considerar la metafísica como una materia vacía, que carece de contenido, le atribuye un carácter negativo. Mas la realidad se nos presenta como un misterio que ansiamos desvelar. Y la ciencia nace de esta infinita curiosidad humana que nunca será completamente satisfecha, puesto que nunca llegará a resolver todos los enigmas que la realidad plantea.

Pero, por otra parte, Einstein consideraba un gran error la distinción que Kant había establecido entre las categorías, conceptos necesarios y *a priori*, como el concepto de realidad o el de causa, y los conceptos de origen empírico, convencionales y *a posteriori*, como el concepto de animal o el de ser humano. Para Kant los primeros son estructuras del entendimiento y los segundos son creaciones de éste a partir de la experiencia. En cambio, para Einstein todos los conceptos son convenciones arbitrariamente creadas por el entendimiento para entender la experiencia. La especulación metafísica da lugar a nuevos y atrevidos conceptos, alejados de la experiencia directa de los sentidos. Por ello la actividad especulativa es útil y no hay que reprimirla. Según Einstein, es un error pensar que todos nuestros conceptos han de abstraerse inmediata e inductivamente a partir de los datos sensoriales. Para Einstein, los conceptos y las reglas sintácticas que los relacionan constituyen simples creaciones del entendimiento humano; por tanto, los sistemas conceptuales, es decir, las teorías, que forman son también construcciones convencionales. Así expresaba Einstein su credo epistemológico⁵¹²:

Veo por una parte la totalidad de las experiencias que nos ofrecen los sentidos y, por otra, la totalidad de los conceptos y proposiciones que se encuentran en los libros. Las relaciones entre los conceptos y las proposiciones son de carácter lógico y la función del pensamiento lógico está estrictamente limitada a conseguir la conexión entre conceptos y proposiciones según leyes firmemente establecidas, que son el objeto de la lógica. Los conceptos y las proposiciones adquieren 'significado', es decir, 'contenido', sólo a través de su conexión con las experiencias que nos ofrecen los sentidos

Aunque Einstein suponía que existe una realidad independientemente de nuestra existencia, creía que de esta realidad sólo conocemos las experiencias que nos aportan los sentidos y que, a partir de ellas, construimos y escogemos libre y convencionalmente los conceptos y las proposiciones, con el objetivo de hacer inteligibles todas aquellas experiencias. En sus propias palabras⁵¹³:

511I. Rosenthal-Schneider, “Presuppositions and Anticipations”, Schilpp (1949), (p.137). I. Rosenthal-Schneider (1891-1990) fue física y filósofa de la ciencia.

512A. Einstein, “Autobiographical Notes”, Schilpp (1949), (p.11)

513A. Einstein, “La influencia de Maxwell en el desarrollo de la concepción de lo físico-real”, publicado en *Mi visión*

Debido a que las percepciones sensoriales sólo dan una información indirecta de este mundo exterior o de la 'realidad física', éste sólo puede ser comprendido por nosotros a través de medios especulativos. De esto se desprende que nuestras nociones de la realidad física nunca pueden ser finales. Tenemos que estar siempre dispuestos a modificar estas nociones —es decir, la estructura axiomática de la física— para justificar de una manera lógica, lo más completa posible, los hechos percibidos

En conclusión, aunque Einstein aludía a menudo a cuestiones metafísicas no se detenía a examinarlas detalladamente con la misma atención y dedicación que prestaba a las cuestiones de la ciencia física. Al igual que en otros temas filosóficos, era un autor poliédrico, que en diferentes ocasiones manifestó puntos de vista diferentes sobre la metafísica y adaptó su pensamiento filosófico a las necesidades de su investigación científica. Y la metafísica que más se adecuaba a sus intereses en su etapa de madurez se podía resumir de la siguiente manera: existe un mundo independientemente del observador; es un mundo que nunca conoceremos completamente pero del cual los sentidos nos envían información; el científico lo intenta explicar mediante sistemas conceptuales que especulativamente construye con la razón, de tal manera que las últimas consecuencias de éstos coincidan con la experiencia de los sentidos.

5. RAZÓN Y EXPERIENCIA SENSORIAL

A la relación, a menudo interpretada como antagonista, entre razón y experiencia sensorial dedicó Einstein gran parte de la conferencia Spencer que ofreció en 1933 en Oxford; esta conferencia, titulada “Acerca del método de la física teórica” es posiblemente, según A. Pais, la comunicación más representativa del pensamiento filosófico de su autor⁵¹⁴.

Einstein, para exponer sus tesis, trazó un desarrollo histórico del tema. En primer lugar, recordó el mérito de los antiguos griegos por haber creado el primer sistema lógico que se conoce; para Einstein el valor del sistema lógico consistía en el hecho de que sus enunciados se siguieran uno del otro con tal rigor que ninguna de sus proposiciones demostradas admitiera la más ligera duda. El éxito que significó la creación del sistema deductivo, mostrado en la geometría de Euclides, dió al

del mundo. Tusquets editores (1986), Barcelona, (p.226)

514 El conferenciante comenzó dirigiéndose al público con la siguiente advertencia: “Si quieres aprender de los métodos del físico teórico no has de escuchar sus palabras sino que has de mirar sus realizaciones”. Por eso él, continuaba diciendo, que era físico, habría de dejar la consideración del tema de la estructura de la ciencia a los epistemólogos. No obstante, —se justificaba Einstein— si no lo hacía era porque, habiendo dedicado mucho tiempo y energía a reformar algunos de los principios de la física teórica, quería conmemorar al hombre al que estaba dedicada la conferencia, a Herbert Spencer, que había dedicado su vida a la unificación del conocimiento.

hombre tal confianza en la razón que le llevó a pensar que la lógica, producto de la razón, era absolutamente necesaria para el conocimiento humano. Pero la lógica no puede aportar conocimiento de la realidad, puesto que éste requiere la información que los sentidos ofrecen a través de la experiencia. Así pues, “las conclusiones obtenidas mediante procesos puramente racionales son vacías en cuanto al conocimiento de la realidad”⁵¹⁵, puesto que todo conocimiento sobre la realidad empieza con la experiencia y termina en ella. Por haber reconocido e inculcado al mundo científico este principio, Galileo fue el padre de la física y de todas las ciencias de la naturaleza.

“Pero si la experiencia es el principio y fin de todo nuestro conocimiento de la realidad, ¿cuál es la función de la razón en la ciencia?” Para responder a esta cuestión, Einstein señaló cuáles son los elementos constituyentes de un sistema completo de física teórica: los conceptos, las leyes básicas que interrelacionan dichos conceptos y las consecuencias que, por deducción lógica, se derivan de dichas leyes. Estos elementos han de cumplir necesariamente dos requisitos: las consecuencias han de corresponder a nuestra experiencia sensorial y la deducción lógica ha de ser realizada por la razón de modo que todos los pasos sean evidentes e indudables. Por consiguiente, en el sistema de física teórica el papel de la experiencia consiste en contrastar las consecuencias de la teoría y el papel de la razón consiste en construir la estructura lógica del sistema.

Como los conceptos y las leyes fundamentales son simplemente “libres invenciones de la mente humana que no admiten justificación *a priori*”, es decir, no son lógicamente deducibles por la razón, toda teoría, según Einstein, ha de simplificar y reducir al máximo estos elementos básicos; pero sin renunciar a la adecuada representación de un solo dato de la experiencia. Sin embargo, Newton, creador del primer sistema amplio y eficiente de física teórica, pensaba que los conceptos y las leyes fundamentales de su sistema podían derivarse de la experiencia. De esta forma interpretaba Einstein su célebre frase “*hypothesis non fingo*” y, aunque Newton dudaba de que a algunas nociones de su sistema les correspondiera alguna experiencia — por ejemplo, al “espacio absoluto” y a la “acción a distancia”—, creía Einstein que el enorme éxito práctico de su teoría impidió que él y los físicos de los siglos XVIII y XIX reconocieran el carácter ficticio de los principios de su sistema.

515A. Einstein, “On the Method of Theoretical Physics”, *Philosophy of Science*, Vol. 1, Nº 2 (Abril de 1934), (p.163-169)

Así pues, los científicos de aquella época creían que los conceptos y las leyes básicas de su teoría provenían de la experiencia mediante un proceso de abstracción intelectual. Pero, según Einstein, la teoría de la relatividad les mostró cuán errónea era esta creencia pues evidenció que era posible que, a partir de dos teorías —en este caso, la de Newton y la de Einstein— con bases esencialmente diferentes se dedujeran lógicamente consecuencias que concordaran en gran medida con la experiencia.

Pero entonces Einstein se planteó una nueva pregunta: si la base axiomática de una teoría física es una libre invención ¿cómo se puede saber si dicha base es correcta? Einstein respondió con absoluta seguridad: el camino correcto es el de la simplicidad matemática. En muchas otras comunicaciones había manifestado⁵¹⁶ la misma convicción; por ejemplo, el criterio de simplicidad le sirvió a él mismo de guía para explicar el efecto fotoeléctrico y también fue de gran ayuda a Copérnico para decidirse por su teoría heliocéntrica. Por ello, Einstein se expresaba así⁵¹⁷: "Nuestra experiencia hasta el momento nos apoya para que estemos seguros de que en la Naturaleza se realiza el ideal de la simplicidad matemática". Aquí Einstein hablaba como Galileo quien, con espíritu pitagórico, manifestaba que el libro de la naturaleza está escrito en lenguaje matemático⁵¹⁸, pues Einstein declaraba⁵¹⁹: "...el principio verdaderamente creativo reside en las matemáticas, en la razón. En cierto sentido, por tanto, mantengo que es verdad que el pensamiento puro es capaz de comprender lo real, como los antiguos soñaban."⁵²⁰

Finalmente, Einstein concluyó su conferencia refiriéndose a un sistema conceptual contemporáneo, dando su punto de vista, desde su posición realista, sobre la interpretación estándar de la teoría cuántica, la ofrecida por Max Born; ésta es, según Einstein, una atrevida interpretación dada a la función de estado de manera que dicha función no constituye un modelo de los objetos atómicos sino tan sólo determina de modo matemático las probabilidades de encontrar dichos objetos en un particular estado si realizamos una medida. Esta concepción, para Einstein, es lógicamente irreprochable y ha producido importantes éxitos, pero no es definitiva sino transitoria; así pues, manifestaba⁵²¹: "Todavía creo en la posibilidad de dar un modelo de la realidad, una teoría que

516H.Margenau, "Einstein's Conception of Reality" .Schilpp (1949),(p.255)

517A.Einstein, *Ibid.* (p.167)

518Galileo Galilei, "Il Saggiatore", cuestión 6, en "Antología y comentario de textos", Grupo Πάντα πει, Edit. Alhambra, Madrid (1981) (p.294)

519A.Einstein, *Ibid.* (p.167)

520En este sentido Einstein se consideraba platónico, como vemos, por ejemplo, en su "Reply to Criticisms".Schilpp (1949) (p.684)

521A.Einstein, *Ibid.* (p.168)

representará los hechos en sí mismos y no simplemente la probabilidad de su aparición.”

También para criticar la teoría cuántica, dos años después, Einstein, publicó, junto a sus dos colaboradores, Podolsky y Rosen, el célebre artículo conocido como EPR, en el que el realismo era esencial por el papel central que en él representaba la noción de realidad física.

6. LA NOCIÓN DE REALIDAD FÍSICA EN EPR

Como hemos visto, cuando Einstein se refería a la realidad física lo hacía normalmente sin manifestar explícitamente qué entendía con este término. Sin embargo, en el artículo EPR⁵²² se presentaba claramente una noción ontológica de realidad física, que aparecía completamente supeditada al objetivo del artículo, que era acusar de incompletud a la teoría cuántica.

EPR comenzaba mostrando el realismo de sus autores, pues éstos, en primer lugar, señalaban que una teoría física siempre ha de tener en cuenta la distinción entre la realidad objetiva, que es independiente de cualquier teoría, y los conceptos físicos con los que la teoría opera. Los físicos intentan que dichos conceptos correspondan a la realidad objetiva y por medio de ellos se representan la realidad. Por eso, para juzgar el éxito de una teoría física, es posible plantear dos preguntas: 1ª) ¿Es correcta la teoría? 2ª) ¿Es completa la descripción que ofrece la teoría? Y sólo en el caso de que se pueda dar respuesta positiva a las dos cuestiones se considera que los conceptos de la teoría son satisfactorios.

Respecto a la primera cuestión, los autores mantienen que la corrección de una teoría depende del grado de acuerdo que se da entre las consecuencias de la teoría y la experiencia sensorial, experiencia que en la ciencia física se muestra a través de los experimentos. Pero los autores manifiestan que en este trabajo se van a limitar tan sólo a intentar responder la segunda cuestión aplicada a la mecánica cuántica.

Seguidamente exponen su noción de completud, que la expresan con estas palabras: ”Cualquiera que sea el significado asignado al término *completo*, la siguiente condición para una teoría completa

522A.Einstein, B.Podolsky y N.Rosen. “Can quantum mechanical description of physical reality be considered complete?” *Physical Review* (1935), 47: 777-80

parece ser necesaria: *cada elemento de la realidad física ha de tener un homólogo en la teoría física*⁵²³. Diremos que ésta es la condición de completud⁵²⁴. Por consiguiente, la segunda pregunta podrá ser respondida si es posible saber cuáles son los elementos de la realidad física. Pero ésta no es una pregunta fácil, especialmente porque los autores no pueden dar una respuesta *a priori*, pues evitan la metafísica y no quieren seguir el camino de la especulación filosófica —que es el habitual en la investigación de este tema— sino el de la experimentación empírica, que es el propio de la ciencia física. Sin embargo las pretensiones de los autores son modestas, pues tan sólo quieren encontrar una definición de realidad que les sea útil para conseguir su objetivo. Escriben:

Una amplia⁵²⁵ definición de realidad es, sin embargo, innecesaria para nuestro propósito. Estaremos satisfechos con el criterio siguiente, que consideramos razonable. *Si, sin perturbar un sistema, podemos predecir con certeza*⁵²⁶ (es decir, con probabilidad igual a la unidad) el valor de una cantidad física, entonces allí existe un elemento de la realidad física correspondiente a esta cantidad física

Los autores admiten que este criterio está muy lejos de satisfacer todas las condiciones requeridas para reconocer una realidad física; por eso añaden inmediatamente que la condición anterior no es una condición necesaria de la realidad, sino simplemente una condición suficiente que está de acuerdo tanto con la concepción clásica como cuántica.

A. Fine⁵²⁷ realizó un exhaustivo análisis del argumento de EPR, que, según él, se basa en dos enunciados:

(INC) La descripción cuántica de un sistema dada por la función de estado es incompleta (es decir, a cada elemento de la realidad física no le corresponde un homólogo en la teoría).

(NSV) Los observables representados por operadores que no conmutan no pueden tener realidad simultánea (es decir, no pueden tener valores precisos al mismo tiempo).

523 “*every element of the physical reality must have a counterpart in the physical theory*”

524 Según H. Margenau, en “Einstein's Conception of Reality” (p.262), no se puede encontrar en ningún escrito de Einstein una exposición del significado de realidad física independiente del de teoría física y, en su opinión, la proposición que expresa la condición de completud constituye una tautología.

525 “*comprehensive*”

526 Aquí se aprecia el carácter determinista que presenta la física para los autores: las predicciones de esta ciencia no han de ser contingentes, sino necesarias

527 A. Fine, *The Shaky Game. Einstein Realism and the Quantum Theory*. The University of Chicago Press. Chicago y Londres, 1986 (p.32)

Según Fine, el argumento principal de EPR se desarrolla en dos partes. La primera demuestra la validez de la disyunción

$$(INC) \vee (NSV)$$

Y la segunda parte demuestra la validez del condicional

$$\sim(INC) \rightarrow \sim(NSV)$$

De estos dos enunciados los autores infieren

$$(INC)$$

La estructura lógica del argumento puede representarse más simplemente de la siguiente manera:

De $P \vee Q$ y $\sim P \rightarrow \sim Q$ se deduce P

Y una demostración⁵²⁸ de la conclusión anterior puede ser:

si del dilema $P \vee Q$ se supone Q entonces, por la ley del MODUS TOLLENDO TOLLENS aplicada a $\sim P \rightarrow \sim Q$, se infiere necesariamente P . Por consiguiente, tanto si se da una opción del dilema, P , como si se da la otra alternativa, Q , siempre se concluye dando P .

En la primera parte, para establecer la disyunción $(INC) \vee (NSV)$, los autores muestran que $\sim(NSV) \rightarrow (INC)$ ⁵²⁹. Para ello, utilizan el ejemplo de una partícula que presenta un único grado de libertad y recuerdan que en la teoría cuántica se supone que su estado está totalmente caracterizado por la función de onda, es decir, que ésta contiene la descripción completa de la partícula en el estado en el que se encuentra. Los autores suponen que un par de observables no conmutables de dicha partícula, como son el momento lineal p y la coordenada de posición q , tienen valores

⁵²⁸ Los autores, en el artículo, no ofrecen ninguna demostración de esta inferencia; deben de suponer que es obvia

⁵²⁹ Por el procedimiento de las tablas de verdad se ve inmediatamente que ambas fórmulas son equivalentes

simultáneos; sin embargo, señalan que en la teoría cuántica ningún estado del sistema es simultáneamente un estado propio de ambos observables; por ello deducen que la descripción dada por la función de onda para tal partícula es incompleta.

En la segunda parte, para establecer la validez del condicional $\sim(\text{INC}) \rightarrow \sim(\text{NSV})$ los autores suponen el antecedente, es decir, que la teoría es completa, y para llegar al consecuente, es decir, que observables no conmutables simultáneamente tienen realidad, utilizan un experimento mental, que consiste en un sistema de dos partículas que interactúan de forma que conservan el momento lineal total en una determinada dirección y se separan en direcciones opuestas de forma que conservan sus posiciones relativas en la misma dirección.

Estas dos partículas, cuyos respectivos momentos lineales y posiciones son (p_1, q_1) y (p_2, q_2) , en un momento inicial se encuentran en un estado con momento lineal total $P = p_1 + p_2$ y distancia relativa $q = q_1 - q_2$. Posteriormente las partículas interactúan, se separan y mucho después se hacen observaciones sobre la partícula 1. Si las partículas están suficientemente separadas en el espacio, los autores suponen que la medida de una partícula no perturba la de la otra. Cuando se mide p_1 se conoce p_2 , sin haber perturbado la partícula 2; por tanto, por el criterio de realidad que los autores han asumido, p_2 es un elemento de la realidad. Y cuando se mide q_1 se conoce también q_2 . Por tanto, q_2 es también un elemento de la realidad. De todo ello los autores concluyen que al menos una partícula ha de tener simultáneamente momento y posición definidos, que constituyen elementos de la realidad. Pero la mecánica cuántica dice que el momento lineal y la posición no pueden ser simultáneamente elementos de la realidad, porque no son observables conmutables. Por consiguiente, la mecánica cuántica no es completa.

Fine muestra que los autores en la segunda parte del artículo no han usado realmente la noción de completud y sólo han intentado mostrar que un cierto sistema tiene posición y momento simultáneos. Así pues, para establecer el condicional $\sim(\text{INC}) \rightarrow \sim(\text{NSV})$ simplemente derivan el consecuente $\sim(\text{NSV})$. Pero (INC) se infiere inmediatamente de la disyunción $(\text{INC}) \vee (\text{NSV})$ de la primera parte y de $\sim(\text{NSV})$ de la segunda. El razonamiento de la segunda parte de EPR presenta unas dificultades de lógica y de estilo que lo hacen innecesaria y extrañamente complejo. Por eso Fine lo califica de "complicado y defectuoso" (*both tangled and flawed*).

EPR ejerció una gran impresión en Bohr, según Rosenfeld⁵³⁰, que trabajó con él “día tras día, semana tras semana” para elaborar una respuesta. La respuesta⁵³¹, que el 29 de junio Bohr hizo pública, incidía en el criterio de realidad de EPR al que Bohr acusaba de contener una “esencial ambigüedad”, que se encontraba, según él, en la expresión “sin alterar un sistema” que forma parte de la definición de realidad física. Según Fine, la respuesta de Bohr a EPR marcó una ruptura respecto a su anterior punto de vista, porque, en escritos anteriores y en su respuesta a Einstein en las conferencias Solvay, Bohr siempre había mantenido que la perturbación creada por la medida de una variable particular provocaba un cambio real en la situación física que alteraba las condiciones. Pero en su respuesta a EPR Bohr cambió su idea de una perturbación física real por la idea de una perturbación puramente semántica. Allí el procedimiento para medir la posición de una partícula en un par simplemente prohibía hablar significativamente del momento lineal de la otra partícula.

Aunque la respuesta de Bohr a EPR es la más famosa, no fue la única. Unos días antes, el 19 de junio de 1935, el mismo Einstein dió una respuesta cuando escribió a Schrödinger respondiendo a una carta de éste en la que trataba de los cálculos de EPR. Respecto al artículo, Einstein escribió⁵³²: “Por razones de estilo éste fue escrito por Podolsky después de mucha discusión. Pero no salió tan bien como yo en principio había querido; más bien lo esencial fue, por así decirlo, oscurecido por el formalismo”. Este comentario se acerca al punto de vista de Fine⁵³³, según el cual la estructura lógicamente opaca del artículo EPR no es propia del estilo de Einstein. Así, éste en su carta a Schrödinger procuró esclarecer las ideas principales del artículo. En primer lugar, intentó clarificar el significado de la aserción sobre la incompletud por medio de una ilustración, que Fine resume de la siguiente manera⁵³⁴:

Consideremos una bola situada en una de dos cajas cerradas. Una descripción incompleta de esta “realidad” podría ser, por ejemplo, “La probabilidad de que la bola se encuentre en la primera caja es $\frac{1}{2}$ “. En cambio, una descripción completa sería, por ejemplo, “La bola está en la primera caja”. Así una descripción incompleta es una aserción probabilística, con probabilidad menor que la unidad, *realizada en circunstancias en las que hay una verdad más profunda que podría ser ofrecida.*

530Según cita Fine en *Ibid.* (p.34) de Rozental (1967)(p.128). L.Rosenfeld (1904-1974) fue colaborador de N.Bohr desde 1930 hasta la muerte de éste, en 1962, y defendió la interpretación de Copenhague.

531Expuesta en una carta del 29 de junio de 1935 al editor de *Nature* y en un artículo publicado el mismo año en *Physical Review* 48:696-702

532Según cita A.Fine en *Ibid.*(p.35)

533A.Fine, *Ibid.*(p.35)

534A.Fine, *Ibid.*(p.36)

Y ello llevaba a Einstein a plantear las preguntas siguientes: ¿cómo se puede saber si hay una verdad que puede ser descubierta? ¿el resultado de la medida refleja lo que ya existe o surge con la medida?

Para responder a estas cuestiones Einstein pensaba que no se podía avanzar sin aceptar nuevos supuestos y por eso proponía asumir un principio de separación por el cual los contenidos de la segunda caja eran independientes de lo que ocurría en la primera⁵³⁵. Y si además se presuponía una obvia ley de conservación según la cual las bolas ni se creaban ni se destruían, entonces inmediatamente, mirando en la primera caja, se podía saber si la bola se encontraba en la segunda caja o no. Evidentemente, si estaba en la primera caja no estaba en la segunda y si no se encontraba en la primera estaba en la segunda. Y si una teoría, en estas circunstancias, sólo podía ofrecer enunciados probabilísticos, que daban probabilidades menores que la unidad, entonces podía considerarse que dicha teoría era incompleta. Por consiguiente, aceptando la ley de conservación, el principio de separación implicaba la incompletud de la teoría.

Fine adapta el argumento de la caja de la manera siguiente: Consideramos el sistema de dos partículas correlacionadas por la ley de conservación del momento lineal total. Supongamos que éstas siguen el principio de separación, por el cual una propiedad física de una partícula no depende de las medidas —ni de otras interacciones— que se realicen en la otra partícula cuando las dos partículas están muy distantes en el espacio. Así, si estas dos partículas, A y B, se encuentran muy alejadas y se mide el momento lineal (en una cierta dirección) de A, entonces por la ley de conservación se puede inferir, a partir del resultado de la medida en A, el momento lineal de la partícula B. Por el principio de separación, esta propiedad había de existir en B cuando se empezó a medir en A porque, si no fuera así, se habría creado en B al medir en A, violando el principio de separación.

Pero al iniciarse la medida en A, según la teoría cuántica, la función de estado del sistema compuesto por las dos partículas A y B no ofrece probabilidad uno para ningún valor del momento de B porque dicho estado es una superposición no trivial de productos de estados propios del momento para A y para B. Por tanto, esta descripción ofrecida por la función de estado que

⁵³⁵Según Fine, *Ibid.* (p.36), Einstein necesitaba el principio de separación para vencer a los talmudistas y decía: "El filósofo talmúdico husmea en la "realidad" como en una criatura espantosa de mente ingenua". Aunque no hay referencias explícitas, Fine cree que Bohr aquí se ha de incluir entre los filósofos talmúdicos. Quienes Fine cree que obviamente Einstein considera talmúdicos son los positivistas.

presenta la teoría cuántica es incompleta. Esta incompatibilidad entre el principio de separación y la condición de completud, que aparece claramente en el ejemplo ilustrativo, constituye, según Fine, la esencia del argumento de EPR. Einstein lo manifestó concisamente, años más tarde, con estas palabras⁵³⁶:

La paradoja⁵³⁷ nos obliga a renunciar a una de las dos aserciones siguientes:

- 1) la descripción por medio de la función- Ψ es *completa*
- 2) los estados reales de los objetos espacialmente separados son independientes uno del otro.

Por eso para Fine la conclusión de EPR no es la incompletud de la mecánica cuántica sino la incompatibilidad entre la noción de completud y el principio de separación.

En cambio, para Pais⁵³⁸ la conclusión de EPR es la incompatibilidad entre la noción de completud de la mecánica cuántica y la noción de realidad objetiva. Según Pais, es el realismo de EPR lo que está reñido con la completud de la cuántica. Así interpreta el penúltimo párrafo del artículo, un fragmento que resume el punto de vista de Einstein sobre la mecánica cuántica — y por eso Pais cree que es la única parte del artículo que sobrevivirá— :

Se llega a la conclusión de que la descripción mecánico-cuántica de la realidad física ofrecida por las funciones de onda no es completa.

Se podría objetar a esta conclusión que nuestro criterio de realidad no es suficientemente restrictivo. Efectivamente, no se llegaría a nuestra conclusión si se insistiera en que dos o más cantidades físicas pueden ser consideradas como simultáneos elementos de realidad *sólo cuando puedan ser simultáneamente medidos o predichos*. Según este punto de vista, ya que una u otra, pero no ambas simultáneamente, de las cantidades P y Q pueden predecirse, no son simultáneamente reales. Esto hace que la realidad de P y Q dependa del proceso de medida realizado en el primer sistema, que no altera de ninguna manera el segundo. Ninguna definición razonable de realidad debe esperarse que permita esto.

536A.Einstein “Reply to Criticisms”(p.682)

537 Einstein aquí está refiriéndose al argumento EPR

538A.Pais, *Ibid.*(p.457)

Finalmente, cabe señalar que Einstein, en un cierto número de comunicaciones posteriores⁵³⁹, reiteró su criterio de realidad física y repitió el argumento EPR sin añadir sustancialmente ninguna nueva idea.

7. CARACTERÍSTICAS DEL REALISMO DE EINSTEIN

La consideración de que la mecánica cuántica es incompleta enlaza con la cuestión de si la estadística es fundamental en dicha teoría, es decir, si ésta admite leyes causales que, para Einstein, son leyes estrictas, no probabilísticas. La causalidad es, según Fine⁵⁴⁰, uno de los tres componentes esenciales del realismo de Einstein. Evidentemente el primero es la noción de un mundo externo independiente del observador. Y el otro es la representación en el espacio y el tiempo. Einstein unía estos tres elementos de la manera siguiente:

La física es el intento de la construcción conceptual de un modelo del mundo real y de su estructura de leyes⁵⁴¹

Algunos físicos, entre los que yo me encuentro, no pueden creer que debemos abandonar, realmente y para siempre, la idea de la directa representación de la realidad física en el espacio y el tiempo; o que debemos aceptar el punto de vista de que los hechos en la naturaleza son análogos a un juego de azar⁵⁴²

Así pues, una teoría realista para Einstein era un modelo conceptual que representaba, con leyes causales, el mundo externo en el espacio y el tiempo. Estas tres nociones, mundo independiente del observador, causalidad y representación espacio-temporal, no están lógicamente conectadas, ya que una teoría puede incorporar una (o dos) de ellas y no incorporar la otra (o las otras); por ejemplo, puede concebirse una teoría causal no espacio-temporal cuyos conceptos se refieran a entidades independientes del observador. Los problemas que presentaba la teoría cuántica llevaron a Einstein a considerar dicha posibilidad. Por ello Einstein inició un proyecto de física no espacio-temporal que calificó de “puramente algebraico” y que tuvo que abandonar posteriormente, puesto que aún

539Según Pais en *Ibid.* (p.457) dichas comunicaciones se encuentran en: *Dialectica*, n° 2, 320 (1948); “Albert Einstein: Philosopher-Scientist (Schilpp) (1949); “Scientific Papers Presented to Max Born”, Hafner, Nueva York (1951), (p.33); “Louis de Broglie, Physicien et Penseur”, Michel, París, (1951), (p.5)

540A.Fine *Ibid.* (p.98)

541Según cita Fine en *Ibid.* (p.97) de la carta de Einstein a Schlick del 28 de noviembre de 1930

542Según cita Fine en *Ibid.* (p. 97) de A. Einstein, “Considerations concerning the fundaments of theoretical physics”, *Science* 91:487-92

no se habían inventado los conceptos matemáticos necesarios para tal proyecto; finalmente, rechazó la idea como “un intento de respirar en el vacío”⁵⁴³. Casi veinte años después, Einstein no era más entusiasta con la idea, y exactamente por la misma razón⁵⁴⁴:

Mi opinión es que si la descripción objetiva a través del campo como un concepto elemental no es posible, entonces se ha de encontrar una posibilidad para evitar el continuum (junto al espacio y el tiempo). Pero no tengo la más ligera idea sobre qué clase de conceptos elementales podrían usarse en tal teoría

Por comentarios como éste, Fine mantiene⁵⁴⁵ que, aunque Einstein deseaba que la física ofreciera una representación en el espacio y el tiempo, podía concebir una física puramente algebraica y podía llegar a aceptar un realismo no espacio-temporal. Pero, en cambio, Einstein nunca hubiera tolerado un realismo no causal, porque no podía admitir una teoría realista sin leyes rigurosas, no probabilísticas. Incluso cuando Einstein decía que el realismo era más central que la causalidad, enlazaba — casi como si no se diera cuenta— las dos nociones⁵⁴⁶:

La cuestión de la “causalidad” no es completamente central, sino más bien la cuestión de la existencia real y la cuestión de saber si hay una categoría cualquiera de leyes rigurosamente válidas (no estadísticas) para la realidad representada teóricamente. Está perfectamente claro que tales leyes existen para los hechos observados. Pero la cuestión es ésta: ¿Hay alguna cosa que sustituya a la “realidad” como programa teórico? Empleando tu lenguaje, diría: Si la “nube” no es la expresión de un hecho único, sino solamente una “nube de probabilidad”, debe entonces existir detrás de la nube un objeto con más características.

Su compromiso con la causalidad se observa ya en una de sus primeras reacciones públicas ante la teoría cuántica a través de su ensayo de 1927 con ocasión del aniversario de la muerte de Newton⁵⁴⁷. Einstein valoraba la clara concepción y la creación, en forma sistemática, del cálculo diferencial e integral por parte de éste y señalaba que: “Para el físico moderno, las leyes diferenciales son aquellas que por sí solas dan respuesta satisfactoria al problema de la causalidad”. Y concluía con las siguientes palabras:

543Según cita Fine en *Ibid.* (p.99) de A. Einstein, “Physics and Reality”. *Journal of the Franklin Institute* 221:349-82

544Según cita Fine en *Ibid.* (p.99) de la carta a Bohm del 25 de octubre de 1954

545Fine, *Ibid.* (p.99)

546Carta a Besso del 15 de abril de 1950. *Spezial*. Tusquets Editores. Barcelona (1994)

547A. Einstein, “La mecánica de Newton y su influencia en el desarrollo de la física teórica” (1927) en *Mi visión del mundo*. Tusquets Editores. Barcelona (1986)

Muchos físicos mantienen — y hay fuertes argumentos en su favor— que ante estos hechos no sólo la ley diferencial [es decir, “cómo el estado de movimiento de un sistema provoca el que inmediatamente sigue en el tiempo”] sino la misma ley de causalidad — por tanto, el último postulado básico de toda ciencia natural— ha colapsado. Incluso se niega la posibilidad de una construcción espacio-temporal, que pueda ser coordinada de forma no ambigua con los hechos físicos, [...] ¿Quién se atrevería hoy a decidir la cuestión de si se han de abandonar definitivamente la ley de la causalidad y la ley diferencial, estas últimas premisas de la visión newtoniana de la naturaleza?

Einstein creía⁵⁴⁸ en el principio de causalidad apoyándose en la historia de la física que, antes de la teoría cuántica, siempre se había basado en una concepción causal; la estructura lógica en la que se fundamentaba la física clásica era la siguiente: los hechos del mundo exterior siguen un desarrollo estrictamente causal, gobernado por leyes estrictas en el espacio y el tiempo, entendiendo “desarrollo causal” en el sentido de que, dado en un tiempo el conocimiento de un conjunto bien definido de condiciones iniciales del estado de un objeto, la evolución futura del objeto se seguiría con certeza de las leyes matemáticas de la naturaleza y por ello sería exactamente predecible. Pero la teoría cuántica alteró el concepto de desarrollo causal de los hechos. Así, según la teoría del átomo de hidrógeno, los saltos de un estado estacionario del átomo a otro ocurren de forma espontánea y no son causados por ninguna influencia exterior. Por tanto, estos saltos no se pueden predecir y sólo es posible determinar el tiempo de vida media, tomado para un gran número de átomos similares en el mismo estado. Esta descripción era, según Heitler⁵⁴⁹, la primera en la que las consideraciones estadísticas y probabilísticas penetraban en las leyes que gobernaban los objetos físicos individuales. Anteriormente, la estadística se había aplicado únicamente a un conjunto de una gran cantidad de objetos, que individualmente obedecían las leyes causales de la física clásica.⁵⁵⁰

En 1923, Einstein⁵⁵¹ había publicado un artículo titulado “¿Ofrece la teoría de campos posibilidades para la solución del problema cuántico?” en el que recordaba los éxitos alcanzados en

548A. Einstein y L. Infeld, *La evolución de la física* (1938) y A. Einstein *La mecánica de Newton y su influencia en el desarrollo de la física teórica* (1927)

549W. Heitler, “Departure from classical thought” Schilpp (p. 184). W. Heitler fue físico teórico y pionero en el campo de la química cuántica.

550El mismo Einstein en su artículo sobre equilibrio radiativo de 1917, según escribe Bohr en “Discussion with Einstein” (Schilpp), (p.205), había formulado reglas estadísticas para las transiciones radiativas entre estados estacionarios y había mostrado que, cuando el átomo está expuesto a un campo de radiación, los procesos de absorción y de emisión ocurren con una probabilidad que es proporcional a la intensidad de la radiación y en ausencia de perturbaciones externas los procesos de emisión espontánea ocurren con una probabilidad determinada *a priori*.

551Pais, *Ibid.* (p.465)

electrodinámica y en la teoría general de la relatividad en cuanto a la descripción causal: los hechos están determinados causalmente por ecuaciones diferenciales, calculadas con condiciones iniciales sobre una superficie espacial. Pero según Einstein este método no podía aplicarse de la misma forma a los problemas cuánticos porque el hecho de que las órbitas de Bohr fueran discretas indicaba que las condiciones iniciales no podían elegirse libremente. Entonces, Einstein se preguntaba: ¿se pueden implementar estas condiciones cuánticas en una teoría causal basada en ecuaciones a derivadas parciales? La respuesta que él daba a continuación era: "Seguramente que sí: sólo debemos 'sobredeterminar' las variables de campo mediante ecuaciones [apropiadas]". Y concluía con estas palabras: "Para mí, el punto principal de esta comunicación es la idea de sobredeterminación".

Así pues, Einstein creía tan firmemente en el principio de causalidad que pensaba que la comprensión de los fenómenos cuánticos no requiere un debilitamiento de la causalidad clásica, como se había hecho en mecánica cuántica, sino, al contrario, un reforzamiento⁵⁵²:

Los fenómenos parecen estar determinados hasta tal punto que, no solamente la secuencia temporal, sino también el estado inicial, queda en gran medida fijado por la ley física. Me pareció que podría expresar esta idea buscando sistemas sobredeterminados de ecuaciones diferenciales[...]Creo firmemente que no llegaremos a una Subkausalität [subcausalidad] sino que, en el sentido indicado, llegaremos a una Überkausalität [Supercausalidad]

Pero llama la atención el punto de vista bajo el cual Einstein trataba la relación de causalidad. Para describirlo, Fine acuña el término "Teorizar"⁵⁵³. Era un punto de vista basado en una idea típica de Einstein, bien conocida en la filosofía analítica, que consiste en el paso que se da cuando se pregunta si "tal y tal es el caso" y se responde cambiando la cuestión y preguntando si una teoría en la que "tal y tal es el caso" es una teoría viable⁵⁵⁴. La cita siguiente⁵⁵⁵ muestra cómo Einstein daba este paso: "En esta explicación nunca puede decirse con certeza si el mundo objetivo es 'causal'. En su lugar se ha de preguntar si una teoría causal se prueba que es mejor que una teoría acausal." Para Einstein la cuestión de si la causalidad en sí (o el determinismo) se mantiene o no se mantiene no es empíricamente determinable. Por ello no es posible decidir si en la naturaleza existen las causas o

552Einstein dirigió las siguientes palabras a Planck en 1929, según cita Pais en *Ibid.* (p.465)

553 "Entheorize" en Fine en *Ibid.* (p.87)

554En palabras de Fine: "wch suwhen asked whether such-and-so is the case, one responds by shifting the question to asking instead whether a theory in such-so is the case is a viable theory"

555Según Fine en *Ibid.* (p.88) de la carta a H.Titze del 16 de enero de 1954

no, sino que sólo se puede decidir si una teoría causal es mejor que una teoría basada en leyes probabilísticas.

Para decidir qué teoría es mejor, es decir, para evaluar las teorías físicas —teniendo en cuenta que Einstein se limita a teorías que estudian todos los cuerpos del cosmos, es decir, a “teorías cuyo objeto es la *totalidad* de todas las apariencias físicas”— Einstein propone seguir dos criterios⁵⁵⁶: 1) la confirmación externa, es decir, que la teoría no contradiga los hechos empíricos, 2) la perfección interna, es decir, la simplicidad lógica⁵⁵⁷ de los conceptos y de las relaciones entre éstos que se toman como fundamento. Y entre teorías de fundamentos igualmente simples es superior la teoría que es más precisa, es decir, la que identifica más exactamente las propiedades de los objetos a que se refiere.

Como hemos visto, Einstein defendía firmemente la causalidad en física; sin embargo, era escéptico respecto a la existencia de dicha relación en la naturaleza. Esta ambivalencia se puede relacionar con la herencia filosófica que había recibido a través de dos de los filósofos cuya influencia él mismo había reconocido en multitud de ocasiones: Spinoza y Hume. Por una parte, Einstein, al ver que no se comprendía su ambición de encontrar explicaciones causales para la totalidad de los fenómenos físicos, se sentía como el filósofo judío⁵⁵⁸ y lo expresaba con estas palabras:

Aunque vivió trescientos años antes que nosotros, la situación espiritual con la que tuvo que verse Spinoza se parece a la nuestra de manera peculiar. La razón de esto está en que él estaba bien convencido de la dependencia causal de todos los fenómenos, en un momento en que era bien modesto el éxito que acompañaba a los esfuerzos de lograr un conocimiento de las relaciones causales de los fenómenos naturales.

Pero, por otra parte, cuando Einstein dudaba de la existencia de la relación de causalidad, porque de ella no tenemos impresión directa, estaba aceptando la crítica del filósofo escocés, para quien⁵⁵⁹

556A. Einstein “Autobiographical Notes” (p.21-23)

557 Precisamente Heisenberg reprochó a Einstein que prefiriera la causalidad a la simplicidad de la mecánica cuántica y le escribió, el 10 de junio de 1927, las siguientes palabras: “usted sacrificaría con gusto la simplicidad al principio de causalidad. Quizá podríamos confortarnos con la idea de que el buen Dios fuera más allá [de la mecánica cuántica] y mantuviera la causalidad. Pero yo, sin embargo, no encuentro hermoso pedir más que una descripción física de la conexión entre experimentos”, según cita Pais en *Ibid.* (p.467)

558 Según cita Pais en *Ibid.* (p.468) de la introducción a R. Kayser, “Spinoza, Portrait of a Spiritual Hero” (1946)

559 D. Hume, “Abstract of Treatise of Human Nature, 1740: A Pamphlet hitherto unknown by David Hume”, Cambridge, Cambridge University Press (1938)

entre la causa y el efecto sólo percibimos contigüidad, prioridad y conjunción constante y, a partir de estas impresiones suponemos una conexión necesaria que nos ayuda a entender el mundo. Así pues, Einstein recomendaba⁵⁶⁰ la idea de Hume de que no tenemos conocimiento directo de la causalidad⁵⁶¹ y escribía respecto a la relación de causalidad: “Hablamos de ella cuando aceptamos una teoría en la que las conexiones son presentadas como racionales [...] Para nosotros las conexiones causales sólo existen como características de las construcciones teóricas.”

8. EL PECULIAR REALISMO DE EINSTEIN

Vemos que a medida que penetramos en el realismo de Einstein éste nos aparece cada vez menos vigoroso, con unos contornos más desdibujados⁵⁶². Por eso nos preguntamos qué tiene el realismo de Einstein de la robusta doctrina que lleva este nombre. Una de las posiciones tradicionalmente consideradas realistas es la que H. Putnam⁵⁶³ denomina “realismo metafísico”, por la cual un realista metafísico acepta las tres tesis siguientes⁵⁶⁴: 1) el mundo externo consiste en la totalidad de objetos que existen independientemente de nuestra mente; 2) hay exactamente una verdadera y completa descripción de cómo es el mundo y 3) la verdad implica una correspondencia entre la descripción de los objetos y la manera de ser de estos objetos. Es evidente que las tres tesis se encuentran interrelacionadas: la segunda tesis se apoya en la primera y la tercera en las dos anteriores.

Esta concepción es muy cercana a la que Holton⁵⁶⁵ atribuye a Einstein, puesto que escribe: “Al final Einstein viene a adherirse a la idea [...] que existe una realidad física objetiva, externa, que podemos esperar conocer”. Holton se basa en fragmentos de Einstein como el siguiente⁵⁶⁶, en el que se refiere a un “axioma básico” de su propio pensamiento:

560Según cita Fine en *Ibid.* (p.87) de la carta a Zeisler del 10 de diciembre de 1952

561Éste es uno de los temas fundamentales que Hume estudió en su *Tratado de la Naturaleza humana*, obra que Einstein leyó y sobre la cual sin duda reflexionó. Así en su carta a Besso del 6 de marzo de 1952 escribió: “En Berna celebrábamos regularmente veladas de lectura filosófica y de discusión con C. Habicht y Solovine, en el curso de las cuales nos ocupábamos sobre todo de Hume (en una excelente edición alemana). Cada lectura tuvo una cierta influencia sobre mi desarrollo, junto con Poincaré y Mach.” Y una muestra de la herencia humeana que Einstein recibió respecto a la noción de causa es la siguiente cita extraída de su autobiografía: “Hume vió claramente que ciertos conceptos, como por ejemplo el de la causalidad, no pueden deducirse de la experiencia por métodos lógicos” (“Autobiographical Notes”, Schilpp (p.13))

562Fine, *Ibid.* (p.105)

563Según H. Putnam en “A Defense of Internal Realism”, publicado en *Realism with a Human Face*. Harvard Univ. Press (1990) (p.30)

564Ésta es también la concepción que G. Holton atribuye a Einstein cuando éste escribe: “Al final Einstein aceptó la visión [...] que existe una realidad física externa que podemos esperar captar. Fine, *Ibid.* (p.106)

565Holton, *Ibid.* (p.202)

566Texto no publicado, destinado aparentemente a ser una respuesta crítica adicional a uno de los ensayos de la colección *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*

Es la postulación de un “mundo real” que, por así decirlo, libera al “mundo” del sujeto que piensa y experimenta. Los positivistas radicales creen que pueden pasar sin este mundo; esto me parece ilusorio a menos que quieran renunciar al mismo pensamiento⁵⁶⁷

Pero, volviendo a la anterior caracterización del realismo metafísico de Putnam, ésta nos lleva a plantear la siguiente cuestión: ¿Qué se encuentra de sus tres tesis en los escritos de Einstein? Hemos visto que se considera realista a Einstein por sus típicas manifestaciones de que la ciencia física intenta captar la realidad tal como es, es decir, independientemente de que sea observada; dichas declaraciones le acercan a la primera de las tesis anteriores; en cambio, en sus trabajos no se encuentran signos de que hubiera admitido claramente las dos tesis restantes. Al leer las notas de Einstein sobre la noción de verdad vemos que ésta no incluye ninguna clase de correspondencia con la realidad, como es propio de un realista en el sentido dado por Putnam, lo que constituye una muestra de que su realismo está muy alejado de la doctrina metafísica estándar que lleva este nombre. Así, en el ensayo “Sobre la verdad científica”⁵⁶⁸, publicado en 1929, Einstein escribió:

No es fácil dar un significado claro de la expresión “verdad científica”. El sentido de la palabra “verdad” cambia según se trate de un hecho de la experiencia, de una proposición matemática o de una teoría científica. Bajo la expresión “verdad religiosa” tampoco puede pensarse nada que sea claro.

Veinte años más tarde, en su autobiografía, Einstein interrumpió la narración histórica para exponer lo que él llamaba su “credo epistemológico”, que contiene el párrafo siguiente⁵⁶⁹:

Una proposición es correcta si, en un sistema lógico, se deduce según las reglas lógicas aceptadas. Un sistema tiene valor de verdad acorde a la certeza y completud de su posibilidad de coordinación con la totalidad de la experiencia. Una proposición correcta adopta su 'verdad' del contenido de verdad del sistema al que pertenece.

Y en 1951, en una breve carta⁵⁷⁰, sobre el mismo tema, escribió:

Verdad es una cualidad que atribuimos a las proposiciones. Cuando atribuimos esta distinción a una

567Holton, *Ibid.* (p. 203)

568A. Einstein, “Sobre la verdad científica”, *Mi visión del mundo*. Tusquets Editores. Barcelona (1986) (p.231)

569A. Einstein, “Autobiographical Notes” (1949) (p.13)

570Carta dirigida a S. Candido del 4 de noviembre de 1951, según cita Fine en *Ibid.*(p.90)

proposición, la aceptamos por deducción. La deducción, y en general el proceso de razonamiento, es nuestro instrumento para dar cohesión a un mundo de percepciones. La distinción “verdadero” se usa de la manera que se cumpla mejor este objetivo.

Estas notas sobre la verdad no apuntan a ninguna teoría genuina de la verdad sino que sólo ofrecen las características fundamentales que Einstein veía en el uso del término “verdad”. Y para él el uso más relevante era el de un enunciado que forma parte de una teoría confirmada con todas las experiencias posibles. La verdad de una proposición no significa nada más que su rol en un sistema que se ha verificado empíricamente. Según Fine⁵⁷¹, no hay nada en los comentarios de Einstein que sugiera la idea realista de que la verdad de un enunciado implique una relación de correspondencia entre el significado del enunciado y la realidad.

Mas esta consideración que ofrecía Einstein de la noción de verdad era típica de su actitud hacia el significado de los conceptos en general, como muestran las siguientes palabras⁵⁷²: “nuestros conceptos [...] y sistemas de conceptos son creaciones humanas, herramientas autoafiladas cuya garantía y valor al final consisten en permitir la coordinación de la experiencia 'con beneficios'”. Para Einstein el beneficio lo ofrecía la teoría como un todo, no un determinado concepto o enunciado.

Einstein también trataba el realismo bajo el mismo punto de vista. Defendía la causalidad — hemos visto— porque le parecía que ofrecía más “beneficios” a las teorías físicas, que las hacía más fructíferas; por este mismo motivo defendía el realismo. Una muestra de esta actitud se encuentra en una de las célebres discusiones que mantuvo respecto a la completud de la mecánica cuántica. Einstein manifestaba que las afirmaciones probabilísticas que ofrecía dicha teoría no agotaban todo lo que se puede decir sobre el estado real del sistema, la “situación real individual tal como existe independientemente de cualquier observación”⁵⁷³, que es lo que constituye “el objetivo programático de toda la ciencia física”. Ante esto, el físico positivista hubiera respondido, según Einstein, que ahí “tenemos la desnuda formulación de un prejuicio metafísico, vacío de contenido”⁵⁷⁴ Para contestarle, Einstein usaba el siguiente ejemplo ilustrativo⁵⁷⁵.

571 Fine, *Ibid.* (p.90)

572 Según cita Fine en *Ibid.* (p. 91) de A. Einstein (1953) en *Scientific papers presented to Max Born*

573 A. Einstein, “Reply to Criticisms” (p.667)

574 A. Einstein, *Ibid.* (p.667)

575 A. Einstein, *Ibid.* (p.667-668)

Consideremos el sistema físico constituido por un átomo radioactivo con un tiempo medio de decaimiento. El átomo, que se encuentra localizado en un punto, experimenta un proceso radioactivo que consiste en la emisión de una partícula comparativamente ligera. Se puede sustituir el átomo por un espacio rodeado por una barrera de energía potencial que en el tiempo=0 incluye la partícula que posteriormente se emitirá. La mecánica cuántica describe el proceso radioactivo con una función- Ψ que en $t=0$ es diferente de 0 sólo en el interior de la barrera pero que en tiempos posteriores se expande en el espacio exterior. Dicha función- Ψ ofrece la probabilidad de que la partícula, en un instante dado, se encuentre realmente en un determinado lugar, pero no ofrece el instante temporal de la desintegración del átomo.

Por todo ello, Einstein se planteaba la siguiente cuestión: ¿puede considerarse la descripción cuántica como la descripción completa de la desintegración de un átomo individual? Einstein respondía inmediatamente que no, porque se sentía:

inclinado a suponer que el átomo individual decae en un tiempo definido; pero este valor del tiempo no se encuentra en la descripción ofrecida por la función- Ψ . Si, por tanto, el átomo tiene un determinado tiempo de desintegración, entonces su descripción a través de la función- Ψ ha de considerarse una descripción incompleta⁵⁷⁶

Por ello Einstein proponía interpretar la función- Ψ , no como la descripción de un sistema singular, sino como la descripción de un conjunto ideal de sistemas, aunque él se mostraba convencido de que era posible encontrar una descripción completa de un único sistema.

Ante ello, pensaba Einstein que el teórico cuántico respondería que la afirmación anterior dependía de la creencia de que existe realmente un instante de tiempo independientemente de cualquier observador. Pero esta aserción para el teórico cuántico no tenía sentido. La afirmación de la existencia de un determinado instante de tiempo para la desintegración tenía sentido sólo si, en principio, era posible determinar empíricamente dicho momento. Pero ello implicaría alterar el sistema. Por consiguiente, determinar empíricamente el momento del decaimiento no permitiría obtener una conclusión referida al sistema inalterado. Así pues, no estaba justificada la creencia de que el átomo tiene un tiempo definido de desintegración, porque según el teórico cuántico el átomo siempre es alterado por la interacción con el instrumento de medida.

⁵⁷⁶A.Einstein, *Ibid.* (p.668)

A Einstein le parecía insostenible la actitud positivista del teórico cuántico por la cual éste sólo aceptaba lo que observaba. Esta actitud positivista seguía, según Einstein⁵⁷⁷ el principio de Berkeley, *esse est percipi.*, ser es ser percibido. En cambio, para Einstein el “ser” es algo que mentalmente construimos, que suponemos. La justificación de conceptos que, como éste, representan la realidad no proviene de lo que nos es ofrecido por los sentidos, sino que sólo radica en sus cualidades para hacer inteligible lo que nos es ofrecido por los sentidos. Aplicar esta consideración al ejemplo del átomo radioactivo llevó a que Einstein escribiera⁵⁷⁸:

No se puede simplemente preguntar: “¿Existe un momento definido para el decaimiento de un solo átomo?” Sino más bien: “¿En el marco de nuestra construcción teórica general es razonable suponer la existencia de un momento definido para el decaimiento de un átomo solo?” No se puede preguntar qué significa este supuesto. Sólo se puede preguntar si tal supuesto es o no es razonable dentro del contexto del sistema conceptual escogido según su capacidad para captar teóricamente lo que es dado empíricamente

Así pues, para Einstein, no sabemos qué significa decir que el átomo realmente tiene un determinado tiempo de decaimiento ni sabemos si esto es verdad. Y sólo podemos saber si una teoría que incluye esta noción es una buena teoría. Si es así, decimos que el átomo tiene un tiempo de decaimiento y este enunciado constituye una descripción de la realidad. En este ejemplo se puede ver cómo Einstein, en el lenguaje de Fine, “enteoriza”⁵⁷⁹ los conceptos relacionados con la realidad —como hemos visto que hace con el de causalidad—, evita estudiar su significado y se concentra en comprobar la adecuación empírica de la teoría a la que pertenecen. Se puede ver esta actitud también en el libro que Einstein escribió con Infeld⁵⁸⁰, en el que los autores ofrecen el símil, familiar a los lectores de Descartes, de que construir una teoría explicativa es como intentar explicar el funcionamiento interno de un reloj cerrado:

Si es ingenioso se puede formar una imagen de un mecanismo que pudiera ser responsable de todo lo que observa, pero no estará nunca seguro de que su imagen sea la única que puede explicar sus observaciones. Nunca podrá comparar la imagen que se ha forjado con el mecanismo real, ni podrá tampoco imaginar la posibilidad o el significado de tal comparación. Pero nuestro hombre estará convencido de que a medida que progresarán sus conocimientos, la imagen que se ha formado de la

577A. Einstein, *Ibid.* (p.669)

578A. Einstein, *Ibid.* (p.669)

579 Fine, *Ibid.* (p. 87)

580A. Einstein y L. Infeld, *Ibid.* (p.50)

realidad será cada vez más simple y explicará dominios de sus impresiones sensibles cada vez mayores. También es posible que crea en un límite ideal del conocimiento que pueda adquirir el espíritu humano. Este límite, es posible que lo llame la verdad objetiva.

Como vemos, Einstein no cree que sea posible comparar los enunciados de una teoría con el mundo externo. Es escéptico respecto a la idea de que la verdad se defina por referencia a un límite ideal y respecto a la misma existencia de este límite ideal al que la ciencia vaya acercándose y al que, finalmente, llegue. Por tal razón, ninguna teoría científica será nunca definitiva.

Como hemos visto, el realismo de Einstein no es la robusta doctrina metafísica que históricamente lleva este nombre sino que más bien consiste, según Fine⁵⁸¹, en el programa de construir teorías realistas que sean empíricamente adecuadas para todos los posibles datos de la experiencia. Einstein expresaba esta idea con las siguientes palabras ⁵⁸²:

Lo “real” en física ha de tomarse como un tipo de programa [...] Probablemente nadie se sienta inclinado a intentar abandonar este programa en el dominio de lo “macroscópico” [...] Pero lo “macroscópico” y lo “microscópico” están tan interrelacionados que parece imposible abandonar este programa sólo en el mundo “microscópico”. Ni puedo ver ningún motivo en ningún hecho observable del campo cuántico para hacerlo así.

Vemos que Einstein aquí, de nuevo, aludía a su creencia de que el éxito de la física clásica constituía el éxito del programa realista, tradicionalmente aceptado hasta el desarrollo de la mecánica cuántica. Para él, las características del mundo cuántico no justificaban en absoluto el abandono del programa realista que se había mostrado fructífero a lo largo de toda la historia de la física. Y, a través del tiempo, las ontologías de las diversas teorías, dentro del programa realista, habían sufrido importantes cambios conceptuales; así, por ejemplo, se había considerado reales las partículas puntuales de Newton y también los campos continuos de Maxwell-Lorentz. Asimismo, la explicación de los fenómenos cuánticos podía necesitar nuevos conceptos sin que fuera necesario abandonar el programa realista que en los otros campos había resultado productivo.

Einstein reiteró su concepción del realismo como programa en diversas ocasiones, por ejemplo,

581A. Fine, *Ibid.* (p.95)

582A. Einstein. “Reply to Criticisms” (p.674)

cuando escribió⁵⁸³:

Es básico para la física que se suponga un mundo real existente independientemente de cualquier acto de percepción. Pero esto no lo *sabemos*. Lo tomamos sólo como un programa en nuestros trabajos científicos. Este programa es, desde luego, precientífico y nuestro lenguaje ordinario se basa ya en él.

Así, según Einstein, el lenguaje de la vida diaria es realista, como lo es su propio lenguaje — por eso, para Fine⁵⁸⁴, el realismo de Einstein es más nominal que metafísico. El lenguaje expresa el supuesto básico realista del pensamiento cotidiano, como lo expresa el de la ciencia física⁵⁸⁵, pues Einstein reconoció que la ciencia es un refinamiento del pensamiento ordinario⁵⁸⁶. La física comenzó con conceptos que habían sido creados para la vida diaria, como la noción de cuerpo físico, la de espacio y la de tiempo⁵⁸⁷. El concepto de cuerpo físico fue el primer concepto realista, pues, al suponer la existencia del mundo real externo, el ser humano supuso la existencia independiente de cada elemento de dicha realidad, es decir, de cada cuerpo. El concepto de cuerpo fue asignado por el pensamiento a un gran conjunto de sensaciones, que fueron arbitrariamente seleccionadas a partir de todas las sensaciones. Pero, para Einstein, el concepto de objeto corporal, lógicamente considerado, no es idéntico al de la totalidad de dichas sensaciones, sino que es una libre creación del espíritu humano (o animal)⁵⁸⁸, aunque deba su significado y justificación a estas sensaciones. Los cuerpos, a pesar de constituir libres creaciones del pensamiento, nos parecen entidades más fijas, menos mutables, que las impresiones directas de los sentidos. La noción de cuerpo u objeto físico fue inventada para comprender el confuso y cambiante mundo de las impresiones sensoriales. Y tuvo éxito, porque ha perdurado.

El concepto de objeto físico de Einstein se puede comparar con el de B.Russell, según el cual un

583Según cita Fine en *Ibid.* (p.95) de la carta a Laserna del 8 de enero de 1955

584A.Fine, *Ibid.* (p.107)

585El realismo ingenuo es, según Einstein, la concepción implícita que mantenemos todos —animales y personas— en nuestra vida cotidiana por la que estamos convencidos de que “las cosas son tal como las perciben nuestros sentidos”. Este supuesto es también el punto de partida de las ciencias de la naturaleza. Pero éstas superan el realismo ingenuo al descubrir que las cualidades que el observador percibe en las cosas (color, dureza...) no son las mismas cualidades que están en las cosas. La consideración de la influencia del observador en la percepción de las cosas ha llevado a filósofos como Berkeley y Hume a dudar de la existencia de ellas, conclusión que a Einstein le parece absolutamente injustificada, según expresa en “B.Russell y el pensamiento filosófico” de *Mi visión del mundo*. Tusquets Editores. Barcelona (1986)

586Según V.F.Lenzen en “Einstein's Theory of Knowledge” (Schilpp) (p.362). De este ensayo Einstein escribió en “Reply to Criticisms” (p.683) que clarificaba de forma espléndida su concepción epistemológica.

587La noción de espacio fue creada por el pensamiento cuando el ser humano observó repetidamente que los cuerpos tienen una extensión en el espacio y la noción de tiempo cuando éste observó que cambian con el paso del tiempo.

588V.F.Lenzen, *Ibid.* (p.365)

objeto físico era una colección de datos sensoriales, es decir, un conjunto de cualidades tomadas directamente por los sentidos. Einstein rechazaba la concepción de Russell, cuyo origen atribuía al “miedo a la metafísica”⁵⁸⁹, provocado por Hume, y manifestaba⁵⁹⁰ “que no puede ver ningún 'peligro metafísico' en el hecho de tomar la cosa (el objeto en el sentido de la física) como un concepto independiente dentro del sistema junto con la propia estructura espacio-temporal.”

Hay muchos pasajes realistas en los textos de Einstein. Para entender el sentido con el que su autor los escribió hemos visto que él mismo aconsejaba que desviáramos las preguntas sobre los conceptos y los enunciados individuales hacia preguntas sobre el soporte empírico del sistema íntegro al que pertenecían. El realismo para Einstein era un programa que ayudaba a construir teorías fructíferas. Por consiguiente, el realismo había de ser tratado no como una doctrina metafísica sino como un programa científico y había de ser juzgado por su capacidad para generar teorías productivas, que era el objetivo prioritario de Einstein.

Pero ¿por qué creía Einstein que el programa realista podía generar más teorías productivas que el programa no realista? Porque pensaba que el programa realista motivaba más al científico. La creencia de que existe un mundo exterior, que es posible conocer gracias al esfuerzo intelectual, daba significado al trabajo científico, empujaba y animaba al investigador, que deseaba intensamente comprender este mundo tal como es. Así pues, Einstein, ya desde 1918, presentó su realismo en términos de motivación para la actividad científica. Comparó la actitud realista a una especie de “sentimiento religioso” que incitaba al trabajo científico sin “deliberada intención o plan, pero directamente desde el corazón”⁵⁹¹ de la misma forma que comparó el estado emocional del científico⁵⁹² al de una persona enamorada, cuya conducta surge “de una directa necesidad”⁵⁹³. Einstein usó expresiones similares en 1949 para describir la atracción por la ciencia que sintió alrededor de los doce años⁵⁹⁴:

589A. Einstein en “Bertrand Russell y el pensamiento filosófico” mostró de nuevo su crítica a Hume, a pesar de la influencia que tantas veces reconoció de él haber recibido, manifestando que al aconsejar evitar todos los conceptos que no deriven de los sentidos, este filósofo había puesto en peligro una parte de la filosofía, motivando la aparición de un “miedo a la metafísica” que se había convertido en una enfermedad de la filosofía empírica de la época.

590V.F. Lenz, *Ibid.* (p.366)

591Según nota de A. Fine de *Ibid.* (p.109)

592Así, Einstein admitía que sin poderse demostrar racionalmente la existencia del mundo material externo se había de aceptar como un supuesto por motivos irracionales, emocionales, puesto que creía que dicho supuesto contribuye a que el científico sea más creativo en la construcción de sus teorías sobre el mundo físico.

593Según cita A. Pais en *Ibid.* (p.41)

594A. Einstein. “Autobiographical Notes” (p.5)

Es absolutamente claro para mí que el paraíso religioso de juventud, que era así perdido, fue un primer intento de liberarme a mí mismo de las cadenas de lo “simplemente-personal”, de una existencia dominada por deseos, esperanzas y sentimientos primitivos. Allí fuera estaba este mundo inmenso, que existe independientemente de nosotros, los seres humanos, y que permanece ante nosotros como un gran, eterno enigma, al menos parcialmente accesible a nuestra inspección y pensamiento. La contemplación de este mundo me atrajo como una liberación [...] La comprensión de este mundo extrapersonal en el marco de las posibilidades dadas se cruzó ante los ojos de mi mente medio consciente y medio inconscientemente. Hombres similarmente motivados del presente y del pasado, así como los logros que consiguieron, eran los amigos que no podía perder. El camino hacia este paraíso no era tan cómodo y seductor como el camino hacia el paraíso religioso; pero se ha comprobado que es digno de crédito y nunca me he arrepentido de haberlo escogido.

Y en 1951, cuando su viejo amigo Solovine le había reprendido por haber usado el término “religioso” en contextos científicos, Einstein le respondió⁵⁹⁵: “No tengo mejor expresión que el término 'religioso' para esta fe en el carácter racional de la realidad y en su accesibilidad, al menos hasta cierto punto, a la razón humana.”

En suma, hemos visto que, de varias maneras y en diferentes momentos, Einstein sugirió que el realismo es la principal motivación que hay tras el trabajo científico creativo; por ello, para él, el realismo no sólo constituye una creencia, sino que es también una actitud, que obedece a un instinto que se encuentra entre las principales fuentes preracionales de las que surge el comportamiento humano.

9. CONCLUSIÓN DEL CAPÍTULO

Aunque Einstein en los últimos treinta años de su vida defendió abiertamente el realismo, especialmente ante el fenomenalismo predominante en mecánica cuántica, su concepción realista es muy peculiar y no se identifica estrictamente con la concepción metafísica que lleva este nombre. Hay que interpretar el discurso realista de Einstein, como él mismo decía, como un programa de pensamiento que lleve a generar teorías productivas, es decir, teorías que, aunque sean sencillas lógicamente, expliquen un amplio campo de datos sensoriales y ofrezcan gran diversidad de predicciones concretas comprobables. Einstein defendía el programa realista porque consideraba que es el que más motiva al científico, el que mejor estimula su actividad creativa, puesto que la

⁵⁹⁵Carta del 1 de enero de 1951 citada por Fine en *Ibid.* (p.110)

confianza de que existe una realidad exterior incita al investigador a buscar cómo es esta realidad objetivamente, al margen de las percepciones subjetivas.

Pero en los escritos de Einstein también hemos visto que hay pasajes que muestran otras diferentes concepciones filosóficas, incluso aquellas de las cuales en ocasiones había renegado, como el positivismo o el idealismo. Ello es debido a que, por una parte, Einstein se interesaba por las cuestiones filosóficas, especialmente por las epistemológicas —su principal propósito era el progreso del conocimiento científico— y pensaba⁵⁹⁶ que ciencia y epistemología son interdependientes, ya que la epistemología sin ciencia es vacía y la ciencia sin epistemología es confusa. Pero, por otra parte, Einstein era ante todo un científico y por ello supeditaba la reflexión filosófica a su vocación científica. No se sentía realmente comprometido con ninguna concepción filosófica, sólo se sentía comprometido con su objetivo de colaborar en la construcción de teorías físicas cada vez más sintéticas, de amplias teorías que englobasen las teorías anteriores y que unificasen la mayor diversidad posible de fenómenos. A este objetivo dedicó Einstein el esfuerzo intelectual de toda su vida y para conseguirlo fue adoptando, consciente o inconscientemente, las ideas que mejor se le adaptaban, permitiendo que penetraran en su pensamiento ideas de distintas concepciones filosóficas, incluso de algunas que parecían contrapuestas. Por eso él mismo escribió que, ante un epistemólogo riguroso, podía parecer un oportunista no consecuente y sin escrúpulos⁵⁹⁷:

El científico [...] acepta con gratitud el análisis conceptual epistemológico; pero las condiciones externas, que le son impuestas por los hechos de la experiencia, no le permiten estar demasiado limitado en la construcción de su mundo conceptual por la adhesión a un sistema epistemológico. Por tanto, ha de aparecer ante el epistemólogo sistemático como una especie de oportunista inescrupuloso: aparece como un *realista* en cuanto busca describir un mundo independiente de los actos de percepción; como un *idealista* en cuanto contempla los conceptos y las teorías como libres invenciones del espíritu humano (no derivables lógicamente de lo que es empíricamente dado); como *positivista* en cuanto considera sus conceptos y teorías justificadas sólo en la medida que suministran una representación lógica de las relaciones entre experiencias sensoriales. Puede también aparecer como platónico o pitagórico en tanto que considera el punto de vista de la simplicidad lógica como un instrumento indispensable y efectivo de su investigación.

Como hemos podido comprobar a través de sus propios textos, en el pensamiento de Einstein

596A.Einstein. "Reply to Criticisms" (p.683)

597A.Einstein. *Ibid.* (p.684)

realmente se encontraban elementos de todas estas concepciones filosóficas, que él integraba sin temor y aplicaba a su trabajo de físico teórico. En conclusión, en este último fragmento citado Einstein mostraba la función que ejercía el realismo en el conjunto de su pensamiento y, a la vez, se retrataba a sí mismo como científico, puesto que él pretendía comprender el mundo como realidad objetiva y para ello intentaba crear nuevos conceptos con los que construir teorías, lógicamente lo más simples posible, de las que se dedujeran consecuencias verificables a través de la experiencia de los sentidos. Ésta constituye la imagen del incansable esfuerzo que durante toda su vida Einstein realizó. Y dentro de esta imagen el realismo representaba el papel principal — hemos visto en la cita anterior que el científico, en primer lugar, aparecía como realista—, porque su motivación primordial siempre fue la comprensión del mundo tal como es realmente, como si no fuera observado.

CAPÍTULO 4. La concepción filosófica de Schrödinger.

ÍNDICE DEL CAPÍTULO

1	Introducción del capítulo.....	221
2	La herencia de Boltzmann y Exner.....	221
3	La creación de la mecánica de ondas.....	226
3.1	Problemas de la teoría de Bohr.....	226
3.2	El legado de Hamilton.....	228
3.3	Las ondas de de Broglie.....	229
3.4	Las ondas de Schrödinger.....	231
3.4.1	La mecánica de ondas de Schrödinger.....	231
3.4.1.1	La 1ª parte del artículo de 1926.....	233
3.4.1.2	La 2ª parte del artículo de 1926.....	235
3.4.1.3	Mecánica de matrices y mecánica de ondas.....	237
3.4.1.4	La 3ª parte del artículo de 1926.....	239
3.4.1.5	La correspondencia con Lorenz.....	239
3.4.1.6	La 4ª parte del artículo de 1926.....	242
3.4.2	El problema del significado de la función de onda.....	244
4	El gato de Schrödinger.....	246
5	El entrelazamiento.....	253
6	La noción de salto cuántico.....	254
7	La noción de partícula elemental.....	258
8	La influencia de Mach.....	262
9	Actitud de Schrödinger ante la metafísica.....	268
10	La concepción metafísica de Schrödinger.....	270
10.1	La justificación del monismo.....	270
10.2	Precedentes del monismo de Schrödinger.....	273
10.3	Schopenhauer y Kant.....	276
11	La imagen del mundo que ofrece la ciencia natural.....	278
11.1	El origen de la ciencia natural.....	278
11.2	El principio de inteligibilidad.....	280
11.3	El principio de objetivación.....	285
11.4	La interferencia sujeto-objeto.....	289

	220
12 Causalidad y azar.....	290
13 El realismo de Schrödinger.....	298
14 Conclusión del capítulo.....	300

1. INTRODUCCIÓN DEL CAPÍTULO

Schrödinger (1881-1961) fue físico y filósofo. Como físico teórico, el valor de su trabajo y de sus descubrimientos, en la creación de la mecánica de ondas, es unánimemente aceptado. En cambio, el valor de sus trabajos filosóficos no es tan ampliamente reconocido. Pero Schrödinger, a lo largo de toda su vida, se interesó profundamente por diferentes cuestiones especulativas de carácter propiamente filosófico y, fruto de sus reflexiones, es un conjunto de escritos de notable interés que presentan un carácter muy diverso. Muchos de sus pensamientos filosóficos fueron cambiando con el paso del tiempo y llegaron incluso a situarse en posiciones que parecen opuestas. Así, sus meditaciones filosóficas, expuestas en artículos, conferencias, seminarios y charlas, no están sistemáticamente desarrolladas y las encontramos dispersas, sin presentar continuidad.

Algunas de sus reflexiones filosóficas muestran relación con su actividad como físico teórico y con los últimos descubrimientos de la época en física atómica, pero muchas de ellas son completamente independientes del dominio de la física; responden a las eternas preguntas que se ha planteado el ser humano y, muestran, sin duda, la vocación de Schrödinger como humanista.

Muchos de los trabajos de Schrödinger surgieron como respuesta o como reacción a trabajos de otros autores por los que Schrödinger fue estimulado a pensar. A menudo estos otros autores formaban parte de la escuela de Copenhague, con la que su polémica es públicamente conocida. Sin embargo, en ocasiones, leyendo los ensayos de Schrödinger, también nos sentimos sorprendidos por el hecho de encontrar que él también mantuvo concepciones que eran propias de aquella escuela con la que frecuentemente se había enfrentado. Por todo ello, en conjunto, la obra conceptual de Schrödinger presenta gran variedad y riqueza de contenidos y nos resulta multidireccional y compleja. Mas, en ella, dentro de su diversidad y complejidad, destacan unas tesis principales que permanecen constantes a lo largo de toda su vida, como las que heredó de L. Boltzmann y de F. Exner, profesores de la Universidad de Viena, donde inició su carrera como físico.

2. LA HERENCIA DE BOLTZMANN Y EXNER

Schrödinger había heredado de L. Boltzmann la línea de pensamiento estadístico y atomístico⁵⁹⁸ en

⁵⁹⁸Así, veremos que Schrödinger siempre defendió la discontinuidad atomista. “El continuo ofrece muchos

la que Schrödinger se mantuvo durante toda su vida⁵⁹⁹. Hablando de Boltzmann, Schrödinger había declarado: “Su línea de pensamiento puede llamarse mi primer amor en ciencia. Nunca nadie así me ha encantado ni volverá a hacerlo de nuevo”⁶⁰⁰. Aunque Schrödinger no pudo asistir a sus clases porque había entrado en la Universidad de Viena en 1906, el año en que murió Boltzmann, influyó decisivamente en él un profesor que había sido discípulo de éste, F.Exner, del cual Schrödinger adquirió las bases para su trabajo posterior. Así, la mayoría de los primeros trabajos de Schrödinger estuvieron dedicados a la aplicación de la mecánica estadística de modo que sus consideraciones posteriores sobre el átomo, que le llevaron a la creación de la mecánica de ondas, están basadas en sus primeros trabajos sobre la teoría estadística de los gases.

Boltzmann explicaba el comportamiento de los gases con la hipótesis atómica⁶⁰¹. Debido al hecho de que el gas estaba compuesto por muchísimos átomos, a los gases se les podía aplicar las leyes de la mecánica newtoniana con metodología estadística. Así Boltzmann mostró que los resultados obtenidos por métodos estadísticos, que implicaban necesariamente una supresión deliberada de muchísimos detalles eran más interesantes que un tratamiento minucioso de todos estos, puesto que aportaban una nueva perspectiva a la situación física a la que se aplicaban⁶⁰². De la misma forma, Schrödinger mantenía⁶⁰³ que la prudente y sistemática ignorancia de los detalles llevaba a descubrir leyes de una nueva clase que ofrecían nueva información sobre fenómenos naturales, humanos y sociales, de la misma manera que las deducciones de la astronomía que se refieren al tamaño y la forma de las galaxias se derivan utilizando datos del número medio de estrellas. Así, para Schrödinger el método estadístico era una característica dominante de su época y un importante instrumento de progreso⁶⁰⁴.

En un principio los métodos estadísticos y el cálculo de probabilidad se habían utilizado sólo para

problemas” escribió en *Ciencia y humanismo*. Tusquets Editores. Barcelona (2009) (p. 40) y también escribió: “Al abandonar la discontinuidad no hemos de temer el perder el largo tiempo honorado atomismo” en *El significado de la Mecánica de Ondas* (p.706)

599La teoría cuántica, a la que Schrödinger dedicó la mayor parte de su trabajo como físico, había surgido del *punto de vista* estadístico, escribe el mismo Schrödinger al recordar que nació de un problema fundamental de la teoría estadística del calor (M Planck, *Teoría de la Radiación de Calor*) “La situación presente en la mecánica cuántica” en *Teoría cuántica y medida* de J.A.Wheeler y W.H.Zurek .Princeton University Press. Princeton (1983) (p. 156)

600W. T. Scott, *Erwin Schrödinger. An Introduction to His Writings*. University of Massachusetts Press. Massachusetts. (1967) (p.15)

601Boltzmann fue atacado por muchos físicos (entre ellos, Mach) que no aceptaban la hipótesis atómica. Fue en 1905 cuando se estableció la realidad de los átomos, gracias al trabajo de Einstein.

602 Así Schrödinger consideraba que el desarrollo de la mecánica estadística del calor y el darwinismo eran las dos teorías más significativas de la ciencia natural del siglo XIX.

603E. Schrödinger, “Physical Science and the Temper of the Age”, en *Science and the Human Temperament*. George Allen & Unwin Ltd. London (1935), disponible también *on line*.

604W.T. Scott, *Erwin Schrödinger. An Introduction to His Writings, Ibid.*, (p 16)

”remediar nuestros defectos, nuestra ignorancia de los detalles o nuestra incapacidad para enfrentarnos con el vasto material observacional”⁶⁰⁵. Pero poco a poco la actitud ante el punto de vista estadístico había cambiado y el caso individual se había considerado completamente desprovisto de interés, tanto si se podía obtener información detallada de él como no, tanto si se podía disponer de un método matemático para enfrentarse a él como no⁶⁰⁶. Más drásticamente que cualquier otra ciencia, la física había promocionado el aspecto estadístico desde una función servil a una función dominante. Fue un paso revolucionario, que, según Schrödinger, afectó a todo el edificio de la ciencia, en cuanto que ésta se halla basada en la física. Boltzmann dió este paso⁶⁰⁷, que implicaba una nueva concepción de las leyes de la Naturaleza: éstas “no son leyes rigurosas en absoluto, sino 'sólo' regularidades estadísticas, basadas en la ley de los grandes números”⁶⁰⁸.

Entre estas leyes de la Naturaleza destaca la 2ª Ley de la Termodinámica, que enuncia el perpetuo incremento de la entropía y muestra la irreversibilidad que se presenta en el curso de la Naturaleza. Según esta ley, los hechos ocurren en una dirección definida, que no puede ser invertida. Dicha tendencia unidireccional marca el paso de un estado más ordenado a otro menos ordenado del conjunto de los átomos implicados en cada proceso. Así, cada sistema evoluciona de forma natural de un estado más ordenado a otro menos ordenado. Y esta ley, para Schrödinger,

es la pura personificación de la ley estadística misma [...] Los hechos suceden en la dirección en que es más probable que ocurran. El calor fluye en la dirección en la que la temperatura cae, porque es billones de billones de veces menos probable que ocurra otra cosa⁶⁰⁹

Un símil⁶¹⁰ de esta tendencia natural, ofrecido por Schrödinger, consiste en una baraja de cartas de juego que ordenamos. Si barajamos una, dos o tres veces, esta baraja ordenada se convertirá en un conjunto desordenado de cartas. Pero puede pensarse también que, barajando el conjunto resultante, se consiga cancelar exactamente el efecto de las últimas operaciones y se restablezca el orden original. No obstante, todos esperamos que se produzca el primer proceso, mas no el segundo—en

605E. Schrödinger .La ley estadística en la Naturaleza. *Nature* Vol.153 (p704)(1944)Gesammelte Abhandlungen (p. 451)

606 Según Schrödinger, “ el primer científico que fue consciente de la función vital de la estadística fue C.Darwin. Su teoría depende de la ley de los grandes números”.

607Y también Gibbs, al otro lado del Atlántico. Según Schrödinger, coincidieron sin conocerse.

608Como la teoría de Darwin.

609E. Schrödinger, “La ley estadística en la Naturaleza”, *Ibid.*, (p.453)

610Presentado por Schrödinger en “Ciència i religió”, una de las Conferencias Tamer ofrecidas en el Trinity College de Cambridge en 1956 y publicadas en E. Schrödinger “Què és la vida? La ment i la matèria” *Ibid* (p 196)

efecto, haría falta esperar mucho tiempo para que la baraja llegara, por azar, a ordenarse.

Así, la regularidad que observamos en los procesos físicos⁶¹¹ es debida a la Ley de la Entropía. En todos los procesos⁶¹² se da una transición desde una situación atómica más ordenada a otra menos ordenada⁶¹³. De esta manera, la proposición fundamental del legado de Boltzmann es que la universalidad de la segunda ley de la termodinámica⁶¹⁴ es en física macroscópica una consecuencia de la existencia de los átomos, de sus grandes cantidades y de unos adecuados supuestos estadísticos.

Esto tiene profundas implicaciones filosóficas. Nuestra comprensión de lo que ocurre en el mundo se reduce a razonamientos sobre grandes números. Podemos hacer predicciones porque podemos contar las posibilidades de cada hecho pensable y averiguar el que es más probable. “Que la probabilidad está, como regla, próxima a la certidumbre es debido al enorme número de átomos individuales o hechos microscópicos que cooperan”⁶¹⁵. La conexión existente entre estadística y atomística es evidente: si la estadística funciona y ayuda a entender el mundo es porque los cuerpos están compuestos de muchísimos átomos.

Así mostraba Schrödinger la herencia que había recibido de Boltzmann en su concepción general de los procesos físicos:

En todo proceso físico en el que observamos tal conformidad a la ley, intervienen innumerables millares – más frecuentemente millares de millones-- de átomos o moléculas[...]Al menos en un gran número de casos, de tipos absolutamente distintos, hemos logrado explicar la regularidad observada, como debida por completo al enorme número de procesos moleculares individuales que cooperan. El proceso individual puede tener o no su propia estricta regularidad: en la observada regularidad del fenómeno

611Schrödinger afirma que la Ley de la Entropía gobierna todos los procesos físicos y químicos, incluso si forman parte de fenómenos tan complejos como la vida orgánica y el nacimiento y el desarrollo de las culturas humanas. “The Law of Chance”, en “Science and the Human Temperament”, *Ibid.*, (p. 39)

612E. Schrödinger “The Law of Chance” en “Science and the Human Temperament”, *Ibid* (p. 36)

613En consecuencia, el balance total del desorden en la Naturaleza aumenta constantemente. E. Schrödinger, “The Law of Chance”, *Ibid.*, (p.39)

614La ley que enuncia que las transformaciones más probables de un sistema aislado son las que mantienen constante o aumentan la entropía. Según Schrödinger, “la ley de la entropía ha tomado el contenido siguiente: todo proceso o acontecimiento procede de un estado relativamente *improbable* – es decir, más o menos molecularmente ordenado-- a uno más *probable* –es decir, a un estado de *mayor desorden* molecular”[...]“la ley de la entropía, que *interviene absolutamente en todo proceso físico real*, ha demostrado claramente ser el *prototipo* de la ley estadística”. E.Schrödinger, *¿Qué es una ley de la Naturaleza?* Fondo de Cultura Económica. México (1975). (p. 21)

615E. Schrödinger, *La ley estadística en la Naturaleza*, *Ibid.*, (p.453)

total *no* tiene que ahondarse en cada uno; por el contrario, queda absolutamente confundido entre millones de procesos análogos y los valores medios son los únicos observables para nosotros.⁶¹⁶

Exner, cuyos pensamientos están inspirados en el trabajo de Boltzmann, llevó más allá⁶¹⁷ el punto de vista estadístico de éste y planteó la cuestión de si toda la física puede tener una naturaleza estadística como consecuencia de su fundamento atomista – esta cuestión la encontramos también a menudo en Schrödinger–. Así manifestaba Exner:

... cada suceso que se presenta en la Naturaleza es el resultado de hechos accidentales. Cuanto mayor es el número de hechos individuales de los cuales se compone un fenómeno, mayor es la probabilidad de que tenga un determinado carácter, mayor la probabilidad de que siga leyes definidas. Si la probabilidad de que un suceso ocurra de una determinada manera es tan elevada que, desde el punto de vista humano, se ha convertido en certeza, entonces hablamos de una “ley de la Naturaleza”. Pero eso es posible sólo si hay un número inimaginablemente grande de hechos individuales, como puede ocurrir en los procesos moleculares. En todos los otros campos, no hay leyes, sólo regularidades y éstas se hacen más dudosas cuanto menor es el número de hechos de los cuales son derivadas, hasta que finalmente, cuando el número se hace demasiado pequeño, se convierten en sucesos sometidos al azar.⁶¹⁸

Exner no tenía evidencia empírica de estas ideas; las justificaba basándose en su creencia intuitiva de que la física se había de basar en una fundamentación unitaria. Por tanto, si las leyes a gran escala eran esencialmente estadísticas, Exner creía que las leyes a pequeña escala también lo tenían que ser⁶¹⁹. La exposición del punto de vista de Exner fue el principal contenido de la conferencia inaugural⁶²⁰ de Schrödinger como profesor en la universidad de Zürich en 1922, titulada “¿Qué es una ley natural?”⁶²¹ Schrödinger reconocía así la originalidad de la aportación de Exner:

616E. Schrödinger, *¿Qué es una ley de la Naturaleza?*, *Ibid.* (p. 17)

617Según Jammer el primer físico que cuestionó el estricto determinismo de las leyes físicas fue L. Boltzmann, aunque fue su discípulo F. Exner quien propuso claramente una concepción en la que los fenómenos macroscópicos constituyen el resultado de gran cantidad de procesos indeterministas (Ver Jammer *Indeterminacy in Physics* y apartado 5 del capítulo sobre Heisenberg de este trabajo). En cambio, en los escritos de Schrödinger aparece F. Exner como el primer físico que criticó el supuesto determinismo de los procesos atómicos.

618Citado por W. Moore en *Schrödinger, life and thought*. Cambridge University Press (1989), (p.153)

619De esta forma, Exner mostraba, como ya había hecho Boltzmann, que con la noción de azar la mecánica estadística hace comprensibles las áreas a las que se aplica. Previamente el azar también había desempeñado un papel significativo para la comprensión de la Naturaleza en la teoría de Darwin. Así, según esta teoría el azar produjo la inteligencia que ha permitido entenderlo. Pero en el ensayo “El futuro de la comprensión”, Schrödinger expone su preocupación porque el modo de vida que prevalece en la sociedad en lugar de promover una evolución que favorezca el progreso de la inteligencia tiende a favorecer la “estupidización”, la decadencia de esta facultad. Advierte del peligro de que la mecanización y la stupidización de la mayoría de los procesos de trabajo contribuyan a que degeneren nuestro órgano de la comprensión, nuestra inteligencia. “El futuro de la comprensión” en *Mente y materia*. (1956) Tusquets Editores. Barcelona (2007).

620En dicha situación se esperaba que el conferenciante tratara de temas generales en un estilo semipopular.

621Ya el título recordaba el de la que había pronunciado F. Exner en similar ocasión en 1907, cuando éste había dado

Fue Franz Exner, un físico experimental, quien por primera vez, en 1919, con perfecta claridad filosófica, lanzó una crítica contra la manera como todo el mundo aceptaba, como *algo dado por sentado*, el determinismo absoluto de los procesos moleculares. Llegó a la conclusión de que aquello era ciertamente *posible*, pero de ninguna manera *necesario* y, examinado más de cerca, *ni siquiera muy probable*⁶²²

Schrödinger concluía su conferencia manifestando su esperanza de que, en un futuro, la concepción de Exner se impusiera en el mundo de la física teórica:

Yo prefiero creer que, una vez libres de nuestra enraizada predilección por la causalidad absoluta, lograremos superar estas dificultades y no que, a la inversa, la teoría atómica –casi casualmente, diríamos-- venga a comprobar el dogma de la causalidad.⁶²³

La posibilidad de una fundamentación acausal de las regularidades de la Naturaleza permaneció, a lo largo de toda la vida de Schrödinger, como un tema central de su epistemología, como veremos más adelante⁶²⁴

3. LA CREACIÓN DE LA MECÁNICA DE ONDAS

La aportación de Schrödinger en la creación de la mecánica de ondas fue el mayor logro de su trabajo como físico. La mecánica de ondas nació en un momento en el que la teoría de Bohr estaba presentando muchas dificultades. La teoría de Schrödinger surgió con el objetivo de resolver dichas dificultades y, para ello, éste siguió la inspiración de de Broglie.

3.1 PROBLEMAS DE LA TEORÍA DE BOHR

Como hemos visto⁶²⁵, Bohr, para explicar la estructura atómica, había seguido el modelo planetario

su conferencia inaugural como *Rektor Magnificus* de la Universidad de Viena: "Leyes de las Ciencias y de las Humanidades". Posteriormente, en 1919, Exner había publicado *Conferencias sobre los fundamentos físicos de las ciencias naturales* en las que ofrecía una explicación detallada de su concepción de los fundamentos estadísticos de las leyes de la naturaleza y sugería que los sucesos moleculares podían no estar sometidos a determinadas leyes sino ser completamente azarosos y desprovistos de cualquier explicación causal

622E.Schrödinger *¿Qué es una ley de la Naturaleza?* "Ibid.(p. 22)

623E.Schrödinger " *Qué es una ley de la Naturaleza?*" Ibid. (p. 26).

624En el apartado titulado "Causalidad y azar" de este trabajo.

625En el anterior capítulo sobre N.Bohr.

de Rutherford y sirviéndose de reglas que para Schrödinger no estaban suficientemente justificadas⁶²⁶ había seleccionado entre todas las órbitas posibles una serie discontinua de ellas –las llamadas órbitas estacionarias– y las había considerado como las únicas órbitas admisibles. Pero, según Schrödinger, la teoría de Bohr presentaba “considerables puntos de insatisfacción”⁶²⁷, que describía así:

En primer lugar, aquellas extrañas reglas para seleccionar las órbitas estacionarias no eran aplicables en realidad más que a algunos sistemas simples, entre los cuales figuraba, por ejemplo, el átomo de hidrógeno, pero no el átomo de helio ni ninguno de los átomos más pesados. Es casi incomprensible cómo a pesar de ello pudo Bohr llegar a deducir de aquellas reglas la teoría del sistema periódico. Hay que atribuirlo a una adivinación o a un fino presentimiento de las reglas precisas que suministró más tarde la mecánica cuántica.

Además, estas reglas incompletas y provisionales de que se servía habían sido, a su vez, establecidas por adivinación: no se conocía cuál era su origen. La frecuencia de revolución en las órbitas estacionarias – por ejemplo, del electrón en el átomo de hidrógeno-- no tenía nada que ver con la frecuencia de la luz emitida a consecuencia de una transición súbita desde una órbita a otra, frecuencia determinada por [...]la diferencia de los niveles. Y esta transición[...]permanecía envuelta en el misterio[...]

La teoría[...] nos dejaba en completa ignorancia acerca del estado en que el sistema se halla durante la mayor parte del tiempo, puesto que guardaba completo silencio respecto a lo que acontece durante la transición.⁶²⁸

En resumen, para Schrödinger, la teoría de Bohr era incompleta porque éste rehusaba plantear preguntas que un físico teórico siempre había de intentar responder, “por lo menos según los principios dominantes en la física teórica”⁶²⁹ que habían prevalecido hasta fines del siglo XIX⁶³⁰. Así, la teoría de Bohr no ofrecía una descripción ni del estado del átomo durante la transición ni de la manera como la onda luminosa se desarrollaba a consecuencia de la transición. La teoría daba el resultado, no los estados intermedios y, de esta manera, exageraba la discontinuidad –que hay que

626E.Schrödinger, *La nueva mecánica ondulatoria* (1927) en Heisenberg. Bohr. Schrödinger. *Física cuántica*. Biblioteca Universal del Círculo de Lectores, colección dirigida por J.M.Sánchez Ron . (p. 484)

627E.Schrödinger, *La nueva mecánica ondulatoria*, *Ibid* (p.484)

628E. Schrödinger, *La nueva teoría ondulatoria*, *Ibid* (p.485)

629E. Schrödinger, *La nueva teoría ondulatoria*, *Ibid* (p.486)

630Aquí Schrödinger gusta de presentarse como un físico clásico. Veremos que no siempre es así. Tiene muchas facetas, presenta posiciones muy diferentes, que cambian considerablemente a lo largo de su vida. Por eso es un pensador que resulta complejo y sorprendente.

reconocer que estaba justificada por las finas rayas del espectro de un gas—. Pero Schrödinger estaba profundamente convencido de que había de haber estados intermedios del átomo.⁶³¹

Por esta razón, Schrödinger pretendía crear una nueva teoría que, preservando las discontinuidades observadas en los espectros, introdujera una continuidad de estados intermedios, de manera que hubiera tal variedad de estados posibles del sistema que permitiera entender el paso del sistema de un estado estacionario a otro, es decir, que fuera gradual —lo cual para Schrödinger era más inteligible que el salto brusco. Para ello Schrödinger pensaba que se había de abandonar la imagen clásica del sistema —que él veía, a efectos prácticos, simplemente como un conjunto de “puntos electrizados”⁶³²— y sustituirla por una imagen completamente diferente, la imagen ondulatoria, según la cual el sistema es un “sistema continuo que ejecuta vibraciones del mismo género que, por ejemplo, un cuerpo elástico o un fluido”⁶³³. A los estados estacionarios de Bohr correspondían en la nueva imagen ondulatoria las vibraciones propias o normales del sistema. Pero en general el sistema no tenía por qué ejecutar una sola vibración propia, sino que podía estar en una superposición de muchas, e incluso todas, las vibraciones propias. Por esta razón el átomo podía encontrarse en una inmensa variedad de estados posibles, que era lo que Schrödinger buscaba.

3.2 EL LEGADO DE HAMILTON

Para encontrar la ecuación de onda que seguía el sistema vibratorio Schrödinger partió del trabajo de Hamilton⁶³⁴, quien había insistido en una idea que había sido olvidada durante largo tiempo, la síntesis de la óptica y la mecánica en un solo formalismo. Así, para Hamilton el movimiento de una masa puntual se regía por la misma ley formal que la propagación de los rayos de luz. Por esta razón, la mecánica había de integrar conceptos ondulatorios. Mas el aparato conceptual del siglo XIX no podía admitir que⁶³⁵, de la misma manera que los rayos eran reemplazados por ondas en óptica, así también las trayectorias de las partículas en mecánica tenían que ser sustituidas por otros

631 Como, recordaba Schrödinger, también había estado convencido M. Planck, quien “durante muchos años se esforzó en paliar su hipótesis de la discontinuidad para hacerla entrar en lo posible en el esquema clásico”. E. Schrödinger, *La nueva teoría ondulatoria*, *Ibid* (p.487)

632 E. Schrödinger, *La nueva teoría ondulatoria*, *Ibid* (p.489)

633 E. Schrödinger, *La nueva teoría ondulatoria*, *Ibid* (p.489)

634 Hamilton había sido el primero que, según M. Jammer, había intentado reconciliar las dos hipótesis más significativas que se habían ofrecido sobre la naturaleza de la luz, la teoría corpuscular de Newton y la ondulatoria de Huygens. M. Jammer. *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*. (1989) (p. 242)

635 Esta es la explicación que presenta M. Jammer ante la indiferencia que habían provocado las ideas de Hamilton durante mucho tiempo. *Ibid* (p.243)

nuevos conceptos, porque ello hubiera llevado necesariamente a renunciar a la noción de partícula⁶³⁶. Por eso no fueron los físicos teóricos, sino los experimentalistas los primeros que se enfrentaron al problema de la dualidad onda-partícula⁶³⁷.

Maurice de Broglie era uno de estos físicos experimentalistas. Especializado en el estudio de los rayos X, inició a su hermano Louis en la investigación experimental y le insistió en la innegable realidad de ambos aspectos, el de onda y el de partícula. Las conversaciones entre ambos hermanos para interpretar los experimentos propiciaron⁶³⁸ que Louis sintiera la necesidad de unir la naturaleza de las partículas materiales y la de las ondas⁶³⁹.

3.3 LAS ONDAS DE BROGLIE

Louis de Broglie, buscando una “teoría sintética de la radiación”⁶⁴⁰, que combinara el aspecto de las ondas y el de las partículas, se dirigió, en primer lugar, a la teoría de los cuantos de Einstein; para conciliar la hipótesis de los cuantos de luz de éste con los fenómenos de interferencia y difracción, partió de la teoría especial de la relatividad y de la relación de Planck $E = h \nu$; consideró el movimiento de una partícula de masa en reposo m_0 y $v = \beta c$ para un observador estacionario y postuló que la partícula es el asiento de un fenómeno periódico interno cuya frecuencia es $\nu_0 = m_0 c^2/h$. Así de Broglie manifestaba:

Teniendo una concepción muy 'realista' de la naturaleza del mundo físico y poca inclinación hacia consideraciones puramente abstractas, deseaba representarme la unión de ondas y partículas de una manera concreta, siendo la partícula un pequeño objeto localizado incorporado en la estructura de una onda que se propaga⁶⁴¹

Y de esta manera se inició la mecánica de ondas. Como Bohr, de Broglie no se basó en complicados análisis matemáticos sino en ideas innovadoras. Empezó, en 1923, considerando dos simples relaciones para la energía de una partícula en reposo: $E = m_0 c^2$ y $E = h\nu_0$, siguiendo la teoría

636 Como veremos más adelante que llevó a Schrödinger, en el apartado sobre la noción de partícula elemental de este trabajo.

637 M. Jammer. *The Conceptual Development of Quantum Mechanics. Ibid.* (p.244)

638 Junto a sus lecturas—por ejemplo, de Langevin— sobre los problemas fundamentales de la física, como la naturaleza del tiempo, del espacio y de la luz. M. Jammer. *The Conceptual Development of Quantum Mechanics. Ibid.* (p.245)

639 M. Jammer. *The Conceptual Development of Quantum Mechanics. Ibid.* (p.245)

640 M. Jammer. *The Conceptual Development of Quantum Mechanics. Ibid.* (p.247)

641 Según cita W. Moore en *Schrödinger, life and thought*. Cambridge University Press. Cambridge (1989) (p.185)

especial de la relatividad de Einstein, que requiere que estas expresiones sean invariantes bajo una transformación de Lorentz, y considerando que

$$m = m_0(1-\beta^2)^{-1/2} \quad \text{siendo } \beta = v/c$$

llegó a

$$v = v_0(1-\beta^2)^{-1/2}$$

De Broglie concluyó que el fenómeno periódico asociado con la partícula que se mueve había de ser una onda. Además postuló el “teorema de la armonía de fases”, según el cual la fase de la onda asociada había de permanecer siempre acorde a la fase de un reloj en la posición de la partícula – medida por un observador en reposo-- y con la ayuda de dicho teorema obtuvo su famosa relación⁶⁴²

$p=h/\lambda$, que relaciona el momento de la partícula con su longitud de onda

Así, para de Broglie, un cuerpo que se mueve es acompañado, guiado, por una onda piloto, que él llama “onda de fase”. Es imposible separar el movimiento del cuerpo y la propagación de la onda⁶⁴³. Supuso, además, que las ondas en sí mismas no llevan energía, sino que de alguna manera guían la energía que se encuentra en la partícula⁶⁴⁴.

Posteriormente de Broglie demostró que la velocidad de la partícula es precisamente la velocidad de grupo de las ondas de fase y que ésta sigue en cada punto de su trayectoria el rayo de su onda de fase, es decir, la normal a la superficie de equifase en dicho punto. En general, la trayectoria de la partícula sigue el principio de Fermat-Maupertius⁶⁴⁵. Mas si la partícula tiene que pasar por un orificio de dimensiones comparables a su longitud de ondas de fase, el paso de la partícula se curva según la difracción de las ondas de fase.

642W.Moore. *Ibid* (p186).

643M.Jammer. *The Conceptual Development of Quantum Mechanics* (p.248)

644Es un supuesto que veremos que también acepta Renninger en su experimento de 1953 con el que pretendía probar empíricamente la imagen de la onda piloto de de Broglie.

645 A partir de la equivalencia del principio de Fermat del menor tiempo y del principio de Maupertius de la menor acción, de Broglie dedujo su famosa relación $\lambda=h/p$, verificada experimentalmente en 1927 por Davisson y Germer y por G.P.Thomson

Pero de Broglie no pudo ofrecer una ecuación de onda que describiera la propagación de sus ondas de materia, la cual fue el gran descubrimiento que posteriormente realizó Schrödinger. Sin embargo, las ondas de de Broglie, en el espacio de tres dimensiones, incluso para muchas partículas, son más físicamente intuitivas que las ondas, mucho más abstractas, de Schrödinger, las cuales se dan en el espacio de la mecánica cuántica, cuyas dimensiones son tres veces el número de partículas del sistema⁶⁴⁶.

3.4 LAS ONDAS DE SCHRÖDINGER

3.4.1 La mecánica de ondas de Schrödinger

La mecánica de ondas de Schrödinger apareció desarrollada por primera vez en un monumental artículo⁶⁴⁷ publicado en partes durante el año 1926. Dicho trabajo constituye una de las obras más significativas de la historia de la física por la repercusión que ha tenido en diversos campos de la ciencia y del pensamiento humano en general.

Previamente Schrödinger, interesado en la mecánica estadística, había leído un artículo⁶⁴⁸ de Einstein sobre teoría cuántica del gas ideal en el que éste expresaba su creencia de que las ideas de de Broglie “eran más que una simple analogía”. Esta opinión indujo a Schrödinger a estudiar lo que él consideraba en aquel momento como “la teoría ondulatoria de de Broglie-Einstein, según la cual un corpúsculo que se mueve no es nada más que la espuma en una radiación de onda en el substrato básico del universo”⁶⁴⁹. Así, Schrödinger manifestaba⁶⁵⁰ que su teoría ondulatoria estaba basada en la noción de “ondas de fase” de de Broglie, quien pensaba que “estaban asociadas al movimiento de puntos materiales, principalmente al movimiento de un electrón o de un protón”. Pero para Schrödinger estos puntos materiales “consistían en, o no eran nada más que, sistemas de ondas”⁶⁵¹. Así pues, con estas palabras Schrödinger iba más allá de la concepción de de Broglie según la cual

646 W.T. Scott. *Ibid* (p.46)

647 Que lleva el significativo título “La cuantización como un problema de valores propios”. Fue publicado en 4 partes y entre la segunda y la tercera Schrödinger también publicó el artículo titulado “La transición continua de la micromecánica a la macromecánica” y “Sobre la relación entre la mecánica cuántica de H, Born y Jordan y la de Schrödinger”. *Collected Papers on Wave Mechanics*. Chelsea Publishing Company. New York (1982)

648 A. Einstein, *Quantentheorie des einatomigen idealen Gases*, Berliner Berichte 1925 (p.3-14)

649 M. Jammer, *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*. *Ibid* (p. 258)

650 E. Schrödinger “Una teoría ondulatoria de la mecánica de átomos y moléculas” (1926) *The physical review*. *Gesammelte Abhandlungen Vol 3* (p 280)

651 E. Schrödinger “Una teoría ondulatoria de la mecánica de átomos y moléculas” (1926) *The physical review*. *Gesammelte Abhandlungen Vol 3* (p 280)

las ondas guiaban a las partículas. Esta aseveración constituía también la primera expresión de la interpretación que daba Schrödinger a su mecánica de ondas: el mundo estaba constituido, en el fondo, por ondas.

Schrödinger, muy interesado en las tesis de de Broglie y sus implicaciones, había dado, a instancias de Debye, un seminario sobre ellas en invierno de 1925 y al final de uno de los coloquios había sucedido lo siguiente :

Debye casualmente manifestó que él pensaba que esta manera de hablar era más bien infantil. Como alumno de Sommerfeld había aprendido que, para tratar debidamente con ondas, se había de tener una ecuación de onda [...] Precisamente unas pocas semanas más tarde [Schrödinger] dió, en el seminario, otra charla que inició diciendo: "Mi colega Debye sugirió que se había de tener una ecuación de onda; pues bien, he encontrado una"⁶⁵².

El camino que permitió a Schrödinger encontrar dicha ecuación de onda se lo había indicado de Broglie con su idea de que las ondas de los electrones en órbita alrededor del núcleo atómico habían de ajustarse a un número entero de longitudes de onda λ en cada órbita (una λ en la primera órbita, dos en la 2ª, tres en la 3ª,...). Es decir, los electrones sólo existían en órbitas que eran determinadas por números enteros, característica que podía considerarse como una propiedad ondulatoria."Los únicos fenómenos que implican números enteros en física son los de interferencia y los relacionados con los modos normales de vibración"⁶⁵³, escribió de Broglie en su tesis doctoral.

Los "modos normales de vibración" son, simplemente, vibraciones, como, por ejemplo, las de una cuerda de violín. Así, la cuerda vibra de modo que sus extremos permanecen inmóviles; si se sujeta el centro de la cuerda, cada mitad vibrará, manteniéndose el centro en reposo; este "modo" de vibración corresponde a una nota más alta, un armónico, del tono fundamental asociado a la cuerda sin puntos en reposo –salvo sus extremos–. Así, en el primer modo, la longitud de onda es el doble que en el segundo y en modos superiores la longitud de la cuerda es un número entero de longitudes de onda (1,2,3,4,...). Por tanto, sólo ondas de cierta frecuencia pueden aparecer en la cuerda.⁶⁵⁴

652W..Moore, *Ibid* (p.192)

653J.Gribbin, *En busca del gato de Schrödinger*; Salvat Editores, Barcelona (1994) (p.73)

654Podemos comprenderlo mejor visualizando la situación siguiente. En lugar de una cuerda recta imaginémosla curvada en un círculo. Vemos que una vibración puede mantenerse en la cuerda si la longitud de la circunferencia equivale a un número entero de longitudes de onda; puesto que una onda que no cumpliera esta condición sería inestable, interferiría consigo misma y desaparecería. J.Gribbin.*En busca del gato de Schrödinger Ibid.* (p.73)

Schrödinger amplió las matemáticas sobre ondas para calcular los niveles de energía permitidos, es decir, las frecuencias permitidas. Pensó que podía encontrar la ecuación de ondas como un problema de valores propios.

3.4.1.1 La primera parte del artículo de 1926

Schrödinger empezaba la primera parte de su famoso artículo de 1926 manifestando que deseaba, en primer lugar, considerar el caso del átomo de hidrógeno y

mostrar que las habituales condiciones de cuantificación podían ser reemplazadas por otro postulado en el que no se introduce la noción de “número entero” simplemente como tal. Más bien cuando éste aparece, surge de la misma manera natural que en el caso de los *números de los nodos* de una cuerda que vibra. La nueva concepción es susceptible de generalización y afecta, creo, muy profundamente a la verdadera naturaleza de las reglas cuánticas.⁶⁵⁵

Así Schrödinger planeaba, en principio, introducir la cuantificación inventando una función ψ que estuviera asociada al proceso de vibración en el átomo y buscaba una ecuación para que ψ tuviera solución sólo para ciertos valores, los “valores propios” (*Eigenwerte*), de la energía. En una carta dirigida a W.Wien escribía: “Pienso que puedo especificar un sistema vibrante que tenga como frecuencias propias los *términos* de las frecuencias de hidrógeno –y de una manera relativamente natural, no a través de suposiciones *ad hoc*”.⁶⁵⁶ Así Schrödinger tenía clara la manera en que las condiciones de cuantización con números enteros surgían como valores propios de una ecuación de onda.

Partió de la ecuación de la mecánica clásica de Hamilton-Jacobi

$$\delta S/\delta t = -H(q,p,t)$$

en la que S es la función principal de Hamilton, H es el hamiltoniano y p y q son los momentos y las coordenadas

⁶⁵⁵E.Schrödinger. *Collected papers on Wave Mechanics*. Chelsea Publishing Company. New York (1982) (p. 1)
⁶⁵⁶W..Moore, *Ibid* (p 196)

Utilizando la relación de de Broglie $\lambda = h / m v$, Schrödinger derivó⁶⁵⁷ la ecuación de onda, independiente del tiempo.⁶⁵⁸

$$\Delta\Psi + 8\pi^2m/h^2(E-V)\Psi = 0$$

en la que Δ es el operador laplaciano, que en coordenadas cartesianas es $\partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2 + \partial^2/\partial z^2$, E es la energía total y V la energía potencial.

Esta ecuación se hallaba sometida a la condición de que Ψ se desvaneciera y desapareciera en el infinito.

Esta parte del artículo de 1926 fue desde el principio considerado un instrumento matemático de gran poder para resolver problemas de la estructura de la materia. Mas, ante él, los científicos, desde un principio, se empezaron a preguntar qué concepción del mundo físico implicaba, es decir, qué nos estaba desvelando sobre la naturaleza del mundo físico. Así, Schrödinger al final de la primera parte del artículo había dedicado varios párrafos a la interpretación de su nueva teoría y a dar una imagen representativa de los procesos de vibración responsables de las condiciones de frecuencia de Bohr para la emisión y absorción de radiación:

Es, desde luego, fuertemente sugerido que hemos de intentar conectar la función ψ con algún *proceso de vibración* en el átomo, que se acercaría más a la realidad que las órbitas electrónicas, la real existencia de las cuales está siendo muy cuestionada en la actualidad [...] La cosa esencial me parece que es que la postulación de los “números enteros” no entra en las reglas cuánticas misteriosamente[...]

Deseo mencionar que fui llevado a estas deliberaciones en primer lugar por los sugestivos artículos de M.Louis de Broglie y por el reflejo sobre la distribución del espacio de aquellas “ondas de fase”, de las cuales él ha mostrado que hay siempre un *número entero*, medido a lo largo del paso, presente en cada período o semiperíodo del electrón.⁶⁵⁹

657Las derivaciones de su ecuación que Schrödinger presentó son, en realidad, argumentos de plausibilidad. El ya había encontrado dicha ecuación antes de derivarla. Lo que pretendía al realizar su derivación era justificarla, mostrar que era correcta. W. Moore, *Ibid* (p 200)

658Aunque, según Moore, realmente Schrödinger sólo justificó su ecuación de ondas, no la derivó de forma lógicamente rigurosa, porque no se puede realmente derivar la ecuación de onda de Schrödinger a partir de la física clásica. *Ibid*. (p.197)

659E.Schrödinger, *Collected Papers on Wave Mechanics, Ibid* (p. 9)

Y, más abajo, aludiendo a la superioridad de su propuesta sobre la teoría de los saltos cuánticos, Schrödinger escribía:

Es difícilmente necesario destacar cuan más agradable sería imaginar que en una transición cuántica la energía cambia de una forma de vibración a otra que pensar en un electrón que salta. El cambio de la forma de vibración puede tener lugar de forma continua en el espacio y el tiempo y puede con toda seguridad durar tanto como dura empíricamente el proceso de emisión [...] No obstante, si durante esta transición se sitúa el átomo en un campo eléctrico que altera las frecuencias propias, entonces los ritmos de las frecuencias del golpe se alteran inmediata y solidariamente mientras el campo está actuando [...]

Un sistema macroscópico [...] produce en general un *pot-pourri* de sus vibraciones propias. Un *pot-pourri* de vibraciones propias sería también permisible para un solo átomo[...]sólo en el estado normal el átomo vibra con una frecuencia propia y sólo por esta razón no radia, es decir, porque no se da ningún golpe⁶⁶⁰

Vemos en esta cita la satisfacción que sentía Schrödinger por no necesitar las nociones de órbita y de salto de un electrón⁶⁶¹. También vemos que, para él, varias vibraciones diferentes podían ocurrir a la vez; por consiguiente, las diferencias de frecuencia de la condición de Bohr correspondían a “golpes” entre diferentes vibraciones propias. Schrödinger creía que la transferencia de energía asociada a estos “golpes” representaba un cambio gradual de energía de una vibración a otra.

3.4.1.2.La segunda parte del artículo de 1926

La segunda parte del artículo de Schrödinger ofrecía una nueva derivación de la ecuación de onda, ahora generalizada a $3n$ dimensiones. Suponía que un sistema mecánico se describía con un conjunto de coordenadas q_i . Así, un punto en el llamado “espacio de configuración”, el espacio- q de $3n$ dimensiones, cuyas coordenadas son q_i , era denominado por Schrödinger “punto imagen” del sistema y su movimiento en el tiempo representaba la trayectoria predicha por la mecánica clásica.

Schrödinger consideraba el “punto imagen” –que denotaría lo que habitualmente entendemos por partícula– del sistema mecánico como un grupo de ondas –que es lo que también se conoce como

⁶⁶⁰E.Schrödinger, *Collected Papers on Wave Mechanics*, *Ibid* (p 11)

⁶⁶¹La nueva explicación de Schrödinger, que sustituye la del salto electrónico, aparece en el apartado titulado “La noción de salto cuántico” de este trabajo.

paquete de ondas-. Y dicho punto imagen, según Schrödinger, correspondería al punto donde un continuo de formas ondulatorias se unen con la misma fase. Así, el proceso mecánico quedaba representado por un modelo ondulatorio. Por ejemplo, en el interior de un átomo,

ningún significado especial se ha de otorgar al paso del electrón [...] y todavía menos a la posición de un electrón en su paso [...] El grupo de ondas no sólo llena todo el dominio del paso a la vez, sino también se extiende lejos en todas las direcciones [...] Esta contradicción se ha sentido tan intensamente que incluso se ha dudado de que si lo que continua en un átomo puede describirse dentro del esquema del espacio y el tiempo. Desde un punto de vista filosófico, se ha de considerar una decisión conclusiva en este sentido como equivalente a una completa rendición. Porque no podemos realmente evitar pensar en términos de espacio y tiempo y lo que no podemos comprender dentro [de este esquema] no lo podemos comprender en absoluto. *Hay* tales cosas pero no creo que la estructura atómica sea una de ellas. Sin embargo, desde nuestro punto de vista, no hay razón para tal duda⁶⁶²

Así, vemos que Schrödinger creía⁶⁶³ que una imagen ondulatoria clásica basada en ondas continuas constituía el fundamento de la física atómica, a pesar de las dificultades que dicha imagen presentaba para ser visualizada.

Schrödinger, para justificar su ecuación de onda, partió de la analogía hamiltoniana entre la mecánica y la óptica⁶⁶⁴. Compartía el punto de vista de de Broglie de que la mecánica newtoniana y la de ondas mantienen la misma relación entre sí que la óptica del rayo y la de la onda. De la misma manera que la noción de rayo de luz había de ser sustituida por la de onda en óptica, así también la noción de trayectoria de una partícula había de ser sustituida por la de movimiento ondulatorio en mecánica.

Pero Schrödinger hubo de aceptar que ideas importantes de la teoría de ondas, tales como la amplitud, la longitud de onda y la frecuencia –o, hablando de forma más general la *forma* onda– no se incluían en la analogía, ya que no existe en mecánica una noción paralela, incluso no se puede mencionar la función de onda más allá de que W ⁶⁶⁵ tenga el significado de la *fase* de las ondas. Así vemos que el mismo Schrödinger siempre tuvo dudas para interpretar el significado físico de la

662E. Schrödinger, *Collected Papers on Wave Mechanics, Ibid*, (p. 27)

663W..Moore, *Ibid.*, (p.208)

664E. Schrödinger, *Collected Papers on Wave Mechanics, Ibid*, (p.13)

665Función de acción que representa el papel de la fase del sistema de ondas

noción de onda de su famosa ecuación, que tan fructífera ha sido para la física y la química posteriores. Así Schrödinger admitía que no podía ofrecer una imagen definitiva de los procesos reales y simplemente podía presentarla de manera cualitativa:

Pensemos en un grupo de ondas de la naturaleza descrita anteriormente, que de alguna manera entra en un pequeño “paso” cerrado, cuyas dimensiones son del orden de la longitud de onda, y por tanto pequeñas, en comparación con las dimensiones del mismo grupo de onda. Está claro que entonces el “paso del sistema” en el sentido de la mecánica clásica, es decir, el paso de la exacta coincidencia de fase perderá completamente su prerrogativa, porque allí existe todo un continuo de puntos antes, atrás y junto al punto particular, en los que hay casi completa coincidencia de fase y que describen “pasos” totalmente diferentes. En otras palabras, el grupo de ondas no sólo llena el dominio de todo el paso sino también se estira más allá de él en todas direcciones.

En *este* sentido interpreto las “ondas de fase” que, de acuerdo a de Broglie, acompañan el paso del electrón.⁶⁶⁶

Por eso, según Schrödinger, había que renunciar a las ideas del “lugar del electrón” y “paso del electrón”. Pero si se abandonan estas nociones entonces nos puede asaltar la duda, como hemos visto⁶⁶⁷, de si es posible describir en el esquema del espacio y el tiempo lo que existe en el interior del átomo. Sin embargo, para Schrödinger, como hemos visto, no hay realmente motivos para dudar, porque somos capaces de comprender la estructura atómica y todo lo que somos capaces de comprender puede situarse dentro del marco espaciotemporal.

3.4.1.3. Mecánica de matrices y mecánica de ondas

Después de publicar la segunda parte de su artículo, Schrödinger publicó otro artículo⁶⁶⁸ en el que analizaba la relación existente entre la mecánica de matrices creada por Heisenberg y su mecánica de ondas⁶⁶⁹. Aunque Schrödinger conocía los primeros artículos sobre mecánica de matrices cuando desarrolló su mecánica de ondas, no fue influido por ellos porque su aproximación, su modo de

666E. Schrödinger, *Collected Papers on Wave Mechanics, Ibid.* (p.26)

667En el fragmento citado dos páginas anteriormente.

668E. Schrödinger, “On the Relation between the Quantum Mechanics of Heisenberg, Born and Jordan, and that of Schrödinger” en *Collected Papers on Wave Mechanics, Ibid.*, (p.45)

669Es un trabajo independiente de los anteriores y de los posteriores, que constituyen una unidad y fue escrito como puente que enlaza éstos, explica en una nota a pie de página su autor. *Ibid.* (p 45)

enfocar el tema y su método de tratarlo eran completamente diferentes. Manifestaba en una nota a pie de página: "No era consciente de ninguna relación con Heisenberg. Yo naturalmente sabía sobre su teoría, pero me sentía desalentado, por no decir repelido, por lo que me parecían difíciles métodos de álgebra trascendental y por la falta de claridad (*Anschaulichkeit*)"⁶⁷⁰.

Schrödinger se mostraba muy sorprendido de que ambas teorías, aunque tenían fundamentales diferencias en el punto de partida, en la presentación, en el método y en todo el aparato matemático que utilizaban, ofrecieran los mismos resultados cuando trataban los mismos problemas, como, por ejemplo, en el caso del oscilador armónico. Así Schrödinger escribía en la introducción:

Sobre todo, parece que las dos teorías se hayan alejado de la mecánica clásica en direcciones diametralmente opuestas. En el trabajo de Heisenberg las variables clásicas continuas son reemplazadas por sistemas de cantidades numéricas discretas (matrices), que dependen de un par de índices enteros y son definidas por ecuaciones *algebraicas*. Los mismos autores describen la teoría como una "auténtica teoría del discontinuum". En cambio, la mecánica de ondas muestra precisamente la tendencia contraria; es un paso desde la mecánica del punto clásica hacia una *teoría del continuum*. En lugar de un proceso descrito en términos de un número finito de variables dependientes que se dan en un número finito de ecuaciones diferenciales totales, tenemos un proceso *como de campo* en el espacio de configuración, que es gobernado por una sola ecuación diferencial *parcial*⁶⁷¹.

Pero Schrödinger veía una estrecha conexión entre ambas teorías porque pensaba que, desde el punto de vista matemático, había identidad entre ellas. Y desplegó todas sus habilidades matemáticas para demostrarlo. El resultado de su análisis fue que matemáticamente las dos teorías eran equivalentes. "Cada discusión de la superioridad de una sobre la otra tiene sólo un objeto ilusorio. Porque son completamente equivalentes desde el punto de vista matemático"⁶⁷², ya que no sólo las matrices pueden construirse a partir de las funciones propias sino también, a la inversa, las funciones pueden construirse a partir de las matrices. Y ello llevaba a Schrödinger a la siguiente reflexión epistemológica:

Hay en la actualidad no pocos físicos que, como Kirchhoff y Mach, consideran que la tarea de la teoría física es simplemente una descripción matemática (*tan económica como sea posible*) de las conexiones empíricas entre cantidades observables, es decir, una descripción que reproduzca la conexión, en la

670E. Schrödinger, *Collected Papers on Wave Mechanics*, *Ibid* (p. 46)

671E. Schrödinger, *Collected Papers on Wave Mechanics. Ibid*, (p. 45)

672E. Schrödinger, *Collected Papers on Wave Mechanics. Ibid*, (p.57)

medida de lo posible, sin la intervención de elementos inobservables. Desde este punto de vista, la equivalencia matemática tiene casi el mismo significado que la equivalencia física⁶⁷³.

Así, según el espíritu de Mach, quizás sea superior la mecánica de matrices, por su completa ausencia de cualquier modelo, pero según Schrödinger privar a un físico de la posibilidad de construir modelos espaciotemporales de los fenómenos subatómicos frenaría el progreso de la teoría porque no se puede avanzar trabajando siempre sólo con ideas abstractas⁶⁷⁴, reprimiendo nuestra intuición, puesto que las personas, de manera natural, intentamos visualizar, imaginar de alguna manera nuestras ideas. Pero Schrödinger reconocía que su teoría presentaba serias dificultades a la intuición; entre otras razones, porque " ψ es una función en el espacio de *configuración*, no en el espacio real"⁶⁷⁵

3.4.1.4. La tercera parte del artículo de 1926

Para completar la exposición del trabajo de Schrödinger hay que mencionar que la tercera parte de su artículo constituyó la primera aplicación significativa de su teoría, porque explicaba adecuadamente el efecto Stark en las líneas de Balmer. Utilizaba el método de *perturbación*⁶⁷⁶, que "está basado en la importante *propiedad de continuidad* poseída por los valores y las funciones propias"⁶⁷⁷

3.4.1.5. La correspondencia con Lorenz

Schrödinger había enviado a Lorenz sus trabajos sobre mecánica de ondas. Este los analizó de forma exhaustiva y llegó a la conclusión de que la nueva teoría presentaba notables dificultades. Por ello le respondió con una larga carta que contenía críticas contundentes. Por otra parte, Lorenz estaba impresionado por el modo como la mecánica de matrices podía derivarse de la mecánica de ondas y escribió a Schrödinger:

673E. Schrödinger, *Collected Papers on Wave Mechanics. Ibid.*, (p. 58)

674W. Moore, *Ibid.* (p.212)

675E. Schrödinger, *Collected Papers on Wave Mechanics, Ibid.*, (p 60)

676 Que es útil cuando no se puede obtener una solución exacta de una ecuación diferencial y se obtiene una solución aproximada aplicando una pequeña alteración (o perturbación) a la condición de un sistema para el cual una solución exacta es posible.

677E. Schrödinger, *Collected Papers on Wave Mechanics, Ibid.*, (p 62)

Si tuviera que escoger entre mecánica de ondas y mecánica de matrices, daría preferencia a la primera por su superior *Anschaulichkeit*, en lo que se refiere sólo a las coordenadas x , y , z . Con un mayor número de grados de libertad, no obstante, no puedo interpretar físicamente las ondas y las vibraciones en el espacio- q y debo decidirme por la mecánica de matrices⁶⁷⁸

Como vemos, la claridad intuitiva, la *Anschaulichkeit*, del modelo era una cualidad muy importante para una teoría, según Lorenz, como lo era también para Schrödinger; y en general la mecánica de ondas era más intuitiva, más fácilmente imaginable; pero la falta de transparencia y la dificultad para ser imaginado que presentaba el espacio de configuración de $3n$ dimensiones de Schrödinger le restaba valor a su teoría, según la opinión de Lorenz, como ya lo había reconocido el propio Schrödinger.

Lorenz también objetaba a la representación de una partícula como paquete de ondas que tal paquete no permaneciera compacto a través del tiempo sino que gradualmente se esparciera. En el campo del átomo de hidrógeno esta diseminación sucedería rápidamente⁶⁷⁹, ya que un paquete de ondas sólo puede mantenerse un intervalo apreciable de tiempo si sus dimensiones son grandes en comparación a la longitud de onda. Así, Lorenz no veía claro el planteamiento general de la teoría de Schrödinger y lo manifestaba con las siguientes palabras:

Tu suposición de que la transformación que nuestra mecánica debe realizar es similar a la transición de la óptica de rayos a la óptica de ondas suena muy tentadora, pero yo todavía tengo dudas sobre ella.

Si te he entendido correctamente, entonces una “partícula”, un electrón, por ejemplo, sería comparable a un paquete de ondas que se mueve con la velocidad de grupo.

Pero un paquete de ondas nunca puede estar unido y permanecer confinado a un pequeño volumen en un largo trayecto. La más suave dispersión en el medio lo apartará de la dirección de propagación e incluso sin esa dispersión siempre se extenderá más y más en la dirección transversal. Por esta inevitable borrosidad un paquete de ondas no me parece muy adecuado para representar cosas a las que atribuir una existencia permanente individual⁶⁸⁰.

678Carta de Lorenz a Schrödinger del 27 de mayo de 1926, *Letters on Wave Mechanics, Ibid.*, (p 44)

679W. Moore, *Ibid.*, (p 215)

680Carta de Lorenz a Schrödinger del 27 de mayo de 1926, *Letters on Wave Mechanics, Ibid.*, (p. 47)

Como vemos, Lorenz no veía la posibilidad de mantener la noción de partícula material en el modelo ondulatorio de Schrödinger⁶⁸¹. Así manifestó en su carta el gran inconveniente que significaba la idea de disolver completamente una partícula como el electrón :

El inconveniente, y es muy serio, es éste: cualquier cosa que supongamos sobre el electrón en el átomo de hidrógeno hemos también de suponerlo de todos los electrones en todos los átomos; hemos de reemplazarlos todos por sistemas de ondas. Pero, entonces, ¿cómo puedo entender el fenómeno de la fotoelectricidad y la emisión de electrones por parte de metales calientes? Las partículas aparecen aquí de forma completamente clara y sin alteración; una vez disueltas, ¿cómo podrían condensarse de nuevo? [...]

Si tomamos un paquete de ondas como modelo del electrón, entonces haciendo esto impedimos la manera de restaurar la materia. Porque es pedir mucho requerir que un paquete de ondas deba condensarse otra vez cuando ha perdido su forma.⁶⁸²

Schrödinger le respondió agradeciéndole su análisis y sus reflexiones :”Usted me ha hecho el extraordinario honor, en 11 páginas escritas, de analizar profundamente y criticar las ideas de mis últimos trabajos. No encuentro palabras para agradecerle suficientemente el valioso regalo que me ha hecho”⁶⁸³. Y a continuación Schrödinger respondía a algunas de las objeciones presentadas por Lorenz.

Schrödinger admitía la dificultad de proyectar las ondas del espacio- q en el espacio ordinario de 3 dimensiones y de interpretarlas físicamente. Pero creía que se podía superar dicha dificultad con su interpretación de $\psi\bar{\psi}$ como una densidad de carga eléctrica.

Respecto a la difuminación de los paquetes de onda, Schrödinger envió una copia de su artículo sobre el oscilador armónico⁶⁸⁴ para el cual se puede construir un paquete de ondas que no se desparrame con el tiempo. Creía Schrödinger que podría construirse lo mismo para otros casos, aunque en aquel momento el problema le pareciera imposible de resolver.

681El mismo Schrödinger admitió que hablando de forma estricta las partículas materiales habían perdido su carácter clásico de partícula, como veremos en el apartado “La noción de partícula material” de este capítulo.

682Carta de Lorenz a Schrödinger del 27 de Mayo de 1926, *Letters on Wave Mechanics, Ibid.*, (p. 48)

683Carta de Schrödinger a Lorenz del 6 de Junio de 1926, *Letters on Wave Mechanics, Ibid.*, (p 55)

684“*The Continuous Transition from Micro- to Macro-Mechanics*”, publicado en 1926, después de la segunda parte del monumental artículo “*Quantisation as a Problem of Proper Values*”

Lorenz inició su carta de respuesta manifestando que las dificultades con las que se había encontrado eran debidas en parte al hecho de que él estaba todavía situado en el marco conceptual de la vieja teoría cuántica y no podía liberarse inmediatamente de él. Pero, aunque al recibir el artículo sobre el oscilador armónico se había alegrado porque había pensado que la idea del paquete de ondas podía ser satisfactoria, finalmente se había desengañado porque había calculado⁶⁸⁵ que en el caso del átomo de hidrógeno no se disponía de vibraciones de onda corta que permitieran que fuera construido un paquete de ondas. Pronto Schrödinger dejó de destacar la imagen del paquete de ondas, que no era una parte esencial de su teoría. Y para Lorenz esta renuncia a los paquetes de onda significó el final de la analogía entre mecánica de ondas y óptica de ondas.

La correspondencia con Lorenz fue muy útil a Schrödinger porque le proporcionó una crítica profunda pero comprensiva de sus ideas. Indudablemente, este intercambio epistolar influyó en el hecho de que empezara a tambalearse la convicción inicial que sentía Schrödinger de la primacía del movimiento de onda como fuente de la realidad física.⁶⁸⁶

Las dudas de Schrödinger también se pueden relacionar⁶⁸⁷ con su personalidad compleja y multifacética. Aunque en 1925 y 1926 estaba tan concentrado en la creación de su teoría científica que no podía dedicarse a las implicaciones filosóficas de su teoría, él en aquel momento se sentía simultáneamente, como veremos, discípulo de Mach en su epistemología, de los Vedanta en su metafísica y seguidor de Boltzmann en su metodología científica. Así, pues, Schrödinger pretendía que una teoría científica ofreciera imágenes de la realidad pero, a la vez, no creía que estas imágenes representaran verdaderamente la realidad.

3.4.1.6. La cuarta parte del artículo de 1926

Schrödinger dedicó la cuarta y última parte de su artículo de 1926 a estudiar el sistema que cambia a través del tiempo. Representa la culminación de su trabajo, puesto que muestra que una función de onda periódica en el tiempo, simbolizada por

685En la carta original que Lorenz envió a Schrödinger el cálculo ocupaba 12 páginas. El resultado del cálculo era que “un paquete de ondas no permanece intacto en una órbita de un número cuántico elevado en el átomo de hidrógeno y, por tanto, no podía utilizarse como un modelo de un electrón”. Lorenz recordaba a Schrödinger que en su ejemplo del oscilador tenía la ventaja de disponer de ondas arbitrariamente cortas y le planteaba otras cuestiones como “¿cómo puede usted distinguir entre carga positiva y negativa?”. *Letters on Wave Mechanics, Ibid.*, (p. 70)

686W. Moore, *Ibid.*, (p. 216)

687Como presenta W. Moore, *Ibid.*, (p. 217)

$$\Psi = \psi \exp(-2\pi i E t / h)$$

implica un operador para la energía $E = -(h/2\pi i) \partial/\partial t$

y entonces la ecuación de onda dependiente del tiempo es

$$\Delta \Psi - 8\pi^2 V/h^2 \Psi + 4\pi i / h \partial\Psi/\partial t = 0 \quad 688$$

Finalmente en la última sección del artículo Schrödinger volvió a tratar de nuevo el problema del significado físico de ψ , que llamaba “escalar de campo”. Intentó modestamente clarificar la interpretación que se le podía dar a ψ :

$\psi\bar{\psi}$ es una especie de *función peso* en el espacio de configuración del sistema. La configuración *mecánica de ondas* del sistema es una *superposición* de muchas, estrictamente hablando *todas*, las configuraciones mecánicas puntuales cinemáticamente posibles. Por tanto, cada configuración mecánica puntual contribuye a la auténtica configuración de mecánica de ondas con un cierto peso, que es dado precisamente por $\psi\bar{\psi}$. Si nos gustan las paradojas podemos decir que el sistema existe simultáneamente⁶⁸⁹ en todas las posiciones cinemáticamente imaginables[...]

Esta nueva interpretación, en principio, nos puede sorprender porque hemos hablado previamente de una manera tan intuitiva y concreta como algo completamente real. Pero hay algo tangible real también tras esta concepción presente, es decir, las fluctuaciones efectivas electrodinámicamente de la densidad espacial eléctrica. La función ψ no está ni más ni menos que para permitir que la totalidad de estas fluctuaciones sean dirigidas y medidas matemáticamente por una sola ecuación diferencial parcial⁶⁹⁰

Vemos que aquí Schrödinger se estaba acercando a la interpretación estadística de la función de onda ofrecida por Born, que presentó en un artículo publicado pocos días después de la

688 Siendo $\Delta = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2 + \partial^2 / \partial z^2$.

La ecuación de Schrödinger toma una forma más simple en términos del operador hamiltoniano H y escribiendo $\hbar = h/2\pi$. Entonces es la famosa fórmula $i \hbar \partial\Psi/\partial t = H \Psi$

689Nos hace pensar en la famosa paradoja del gato que años después publicó y que trataremos en un próximo apartado
690E.Schrödinger, *Collected Papers on Wave Mechanics, Ibid.*,(p.120)

comunicación donde se encuentra la cita anterior. Esta similitud hace que nos sorprendamos cuando nos encontramos que Schrödinger rechazaba la interpretación estadística de Born⁶⁹¹. Vemos en esta cita también que mencionaba el problema de la realidad de las ondas, tema que posteriormente volvería a tratar⁶⁹².

Finalmente, hay que tener en cuenta que el mismo Schrödinger admitía⁶⁹³ que su teoría no era capaz de explicar todas las características de los fenómenos físicos y que este objetivo probablemente sólo se podría conseguir a través de la unión armónica de las dos “teorías extremas”, la teoría ondulatoria y la corpuscular.

3.4.2. El problema del significado de la función de onda ψ

Schrödinger ofreció sucesivamente cuatro⁶⁹⁴ diferentes interpretaciones de la función de onda ψ . La primera aparece bosquejada en las dos primeras partes del monumental artículo de 1926. Entonces, en enero y febrero, consideraba la función ψ como una descripción directa de los procesos ondulatorios que se dan dentro del átomo. Sin embargo, al principio de la primavera, se dio cuenta de que esta interpretación sólo podía deducir los modos propios del sistema vibratorio pero no podía explicar satisfactoriamente los procesos de radiación, especialmente las intensidades de las líneas. Así, después de haber demostrado la equivalencia matemática de su mecánica de ondas con la de Heisenberg, concluyó que la función ψ se había de considerar simplemente un concepto auxiliar (*hilfbegriff*) y, como hemos visto⁶⁹⁵, la descripción adecuada de los procesos atómicos la ofrecía el producto $-e\psi\bar{\psi}$, que se consideraba una densidad de carga eléctrica. Pero esta

691 Por ejemplo, Schrödinger manifestaba: “Una obvia interpretación estadística de ψ se ha dado...Esta concepción es un poco insatisfactoria porque no ofrece explicación de por qué las cantidades [...] deducen toda la información que deducen” Cuarta conferencia en *Collected Papers on Wave Mechanics*, (p. 206).

Una muestra de cómo cambió la postura de Schrödinger es la siguiente declaración: “Me disgustaba la interpretación de probabilidad...pero pronto y durante un largo período de tiempo tuve que dejar de oponerme a ella y aceptarla como una solución oportuna provisional” *The Meaning of Wave Mechanics*. Gesammelte Abhandlungen. Vol 3 (p 698) Österreichische Akademie der Wissenschaften (1984) Viena

692 Después de 1926, año que Schrödinger dedicó completamente a la creación de las ideas fundamentales de su teoría y su exposición matemática, se dedicó a su interpretación filosófica y a su divulgación a través de multitud de ensayos y conferencias divulgativas, que estudiaremos en apartados posteriores de este trabajo. Uno de los temas objeto de su reflexión filosófica es el de la realidad del mundo

693 E. Schrödinger. *An undulatory theory of the Mechanics of Atoms and Molecules*. Second Series. Dec, 1926. Vol 28, No 6. Gesammelte Abhandlungen. Band 3, (p. 1050).

Este artículo, publicado en *Physical Review* en diciembre de 1926, constituye una bella y clara síntesis del largo artículo que Schrödinger había publicado en partes a lo largo del mismo año.

694 Según M. Bitbol, en *Schrödinger's Philosophy of Quantum Mechanics*. Edit Kluwer Academic Publishers. Dordrecht (1996)(p.1) y en la recopilación de ensayos de E.Schrödinger “The Interpretation of Quantum Mechanics”. Edit M.Bitbol . Woodbridge (p. 2)

695 En la última cita del apartado anterior.

segunda interpretación de Schrödinger no resolvió todas las dificultades que presentaba la primera interpretación.

Los intentos de Schrödinger por conseguir una interpretación adecuada de la función de onda se frenaron con la aparición de la interpretación probabilística de Born y con la presión de las críticas de los físicos de Göttingen y Copenhague, que elaboraron una interpretación de la mecánica cuántica cuyos pilares eran el principio de indeterminación de Heisenberg y el de complementariedad de Bohr. Así a partir de 1928 Schrödinger se decidió a explicar la mecánica cuántica según la interpretación de Copenhague⁶⁹⁶. Esta constituye, por tanto, la tercera interpretación que ofreció Schrödinger.

Pero el año 1935 hubo un cambio significativo. Después de la publicación de EPR y de la posterior correspondencia con Einstein, Schrödinger publicó unos artículos –entre los cuales se encuentra el que contiene el célebre experimento mental del gato– en los que manifestó y justificó su escepticismo sobre la interpretación mayoritariamente aceptada de la mecánica cuántica, aunque admitiera que se sentía incapaz de ofrecer una alternativa satisfactoria. Finalmente, a últimos de los años 40 y principios de los 50, Schrödinger volvió a manifestar una personal concepción de la mecánica cuántica, que fue considerada como el retorno⁶⁹⁷ a su primera interpretación de onda del año 1926. Pero, si se profundiza más, se ve que ello no significó simplemente volver a la misma interpretación⁶⁹⁸ sino que constituyó una sistemática aplicación de la idea de que, en general, una representación no refleja exactamente los hechos experimentados.

Se ha considerado también que los diferentes intentos de Schrödinger de dar una interpretación de la función de onda están relacionados con sus dudas filosóficas; así, su primera y última interpretación surgen de su actitud realista, mientras que su aceptación de la interpretación de Copenhague surge de su actitud antirealista. Efectivamente, hay en sus trabajos de 1926 y de 1950 expresiones de fuerte realismo y en sus conferencias de principios de los años 30 hay expresiones más antirealistas que las de la escuela de Copenhague. Pero estos grandes cambios se pueden

696 Ver nota a pie de página del apartado anterior, en la que se ve que el mismo Schrödinger admitía que aunque no le gustaba la interpretación estadística llegó a adoptarla de provisionalmente.

697 Esta vuelta a la primera interpretación de ψ fue unánimemente rechazada por la comunidad científica. Por ejemplo, Pauli la calificó de “neurótica” regresión. Algunos físicos, como Einstein y de Broglie, la aceptaron, sin aprobarla, porque la interpretación de Schrödinger les pareció un apoyo “realista” en su lucha contra lo que ellos consideraban el “dogma”. Pero la aparente coincidencia de estos tres físicos en el realismo era verbal y epistemológica, no metafísica, puesto que las concepciones que mantenían sobre qué es la realidad eran muy diferentes.

698 E. Schrödinger, *The Interpretation of Quantum Mechanics, Ibid.*, (p.4)

entender también por el fondo metafísico de Schrödinger, por su monismo. La insistencia de Schrödinger en la realidad de entidades teóricas como la función de onda no era debida a un realismo metafísico sino epistemológico. Decir que la función de onda era “real” no era decir que era una “cosa en sí” sino que era una construcción teórica como las que nos formamos durante la infancia para sobrevivir en nuestro ambiente, es decir, como las nociones de los cuerpos materiales de nuestra vida cotidiana.

4. EL GATO DE SCHRÖDINGER

La paradoja del gato de Schrödinger es uno de los iconos más conocidos del folklore cuántico. Surgió en el contexto del artículo EPR y de la posterior correspondencia que el artículo generó entre Einstein y Schrödinger, mantenida durante el verano de 1935. Así, el 15 de mayo de este año apareció el artículo EPR, que cuestionaba la completud –pero no la corrección– de la mecánica cuántica y concluía que dicha teoría era incompleta. El 7 de junio del mismo año Schrödinger escribió a Einstein: “Estoy muy feliz porque en el artículo recién publicado con P.R. usted ha cogido, evidentemente, la dogmática mecánica cuántica por la cola”⁶⁹⁹. Después de analizar diversos puntos del artículo EPR, Schrödinger concluía: “Mi interpretación es que no tenemos una mecánica cuántica que sea consistente con la teoría de la relatividad, es decir, con una velocidad de transmisión finita de todas las influencias [...] El proceso de separación no está logrado por el esquema ortodoxo”. Schrödinger había visto que el punto esencial de EPR era el principio de separación.

Einstein respondió inmediatamente⁷⁰⁰:

La dificultad real se basa en el hecho de que la física es una clase de metafísica; la física describe la realidad; la conocemos sólo a través de su descripción física. Toda física es una descripción de la realidad; pero esta descripción puede ser “completa” o “incompleta” [...] Lo explicaré con la siguiente analogía:

Frente a mí hay dos cajas, con tapas que se pueden abrir y dentro de las cuales puedo mirar cuando están abiertas[. ..] Hay una bola que se puede encontrar en una o la otra de las dos cajas cuando se hace la

⁶⁹⁹ “*coat-tails*”, W. Moore, *Ibid.*, (p. 304)

⁷⁰⁰ Tema tratado en el apartado “La noción de realidad física en EPR” del capítulo de Einstein de este trabajo

observación.

Ahora yo describo la situación así: la probabilidad de que la bola esté en la primera caja es $\frac{1}{2}$. ¿Es ésta una descripción completa?

NO. Una descripción completa es: la bola está en la primera caja (o no) Esta es la manera de expresar la caracterización del estado con una descripción completa⁷⁰¹

Como hemos visto, Einstein era consciente de que para avanzar había de asumir supuestos; por eso propuso un principio de separación, según el cual “los contenidos de la segunda caja son independientes de lo que ocurre en la primera caja”⁷⁰²

Así, es la violación del principio de separación lo que introduce la “misteriosa acción a distancia” .

En una carta posterior, del 8 de agosto, Einstein escribía a Schrödinger:

Eres la única persona con la cual yo realmente deseo llegar a un acuerdo. Casi todos los otros compañeros no miran desde los hechos a la teoría sino desde la teoría a los hechos; no pueden desenredarse cuando han aceptado la red conceptual, sino sólo dejarse caer en ella de manera grotesca [...]Mi solución:

La función ψ no describe el estado de un sistema individual sino (estadísticamente) de un conjunto de sistemas. Comparada a una ψ , una combinación lineal $c_1\psi_A + c_2\psi_B$ significa una extensión de la totalidad

de sistemas.El cambio que el sistema, consistente en dos partes, presenta cuando hago una observación en *A significa*, a la inversa, la separación de una totalidad parcial del conjunto completo[...]

Pero tu ves en ψ la representación de la realidad⁷⁰³

701 Fragmento de la carta que Einstein envió a Schrödinger el 17 de junio de 1935. A . Fine, *The Shaky Game*, The University of Chicago Press, Chicago (1986), (p. 69)

702A .Fine, *Ibid.*, (p. 36)

703W. Moore, *Ibid.*, (p.305)

Como vemos aquí, la interpretación que Einstein daba a ψ era estadística, a través de conjuntos. Einstein no aceptaba la antigua interpretación de Schrödinger de ψ como representación directa de la realidad física. A partir de su correspondencia no se puede ver claramente⁷⁰⁴ si Einstein había olvidado que Schrödinger se había apartado de aquella interpretación⁷⁰⁵ o si pensaba que aún estaba tentado de volver a ella. Así, Einstein, unas líneas más abajo en su carta, escribía:

Este punto de vista (la interpretación de ψ según Schrödinger) es ciertamente coherente, pero no creo que sea capaz de evitar las dificultades. Me gustaría mostrarte esto por medio de un crudo ejemplo macroscópico⁷⁰⁶

Este ejemplo presentará las mismas dificultades que el sistema microscópico de las dos partículas de EPR. Einstein pretendía con su nuevo ejemplo macroscópico mostrar que hay una situación con una descripción probabilística en términos de mecánica cuántica, es decir, con la función ψ ; pero, de hecho, esta descripción no es la más adecuada. El ejemplo que Einstein mostraba a Schrödinger era el siguiente:

El sistema es una substancia que se encuentra en equilibrio químico inestable, quizás una carga de pólvora que, por medio de fuerzas intrínsecas, puede inmediatamente quemar y donde la vida media de todo el conjunto se extiende a un año. En principio esto puede fácilmente representarse a través de la mecánica cuántica. Al comienzo la función ψ caracteriza un estado macroscópico razonablemente bien definido. Pero, según tu ecuación, después de un año no es lo mismo en absoluto. Más bien entonces la función ψ describe una especie de mezcla de sistemas, uno que aún no ha explotado y otro que ya ha explotado. A través de ningún arte de interpretación puede esta función ψ convertirse en una adecuada descripción de un estado real de hechos; porque en realidad no hay intermedio entre explotado y no explotado⁷⁰⁷

Esta pólvora de Einstein pronto reaparecerá en la forma del gato de Schrödinger. Ambos experimentos mentales tienen el mismo objetivo y utilizan la misma idea, trasladar la función ψ al mundo macroscópico al dejar que la función ψ de un microsistema evolucione con el tiempo. En ambos el estado cuántico final es una combinación de dos términos opuestos, explotado y no-explotado, vivo y muerto.

⁷⁰⁴Según Fine, *Ibid.*, (p. 77)

⁷⁰⁵Ver el apartado de “El problema del significado de la función de onda” de este capítulo

⁷⁰⁶A. Fine, *Ibid.*, (p. 77)

⁷⁰⁷A. Fine, *Ibid.*, (p. 78)

Sólo 11 días después, el 19 de agosto, Schrödinger le respondió:

Hace tiempo que pasé la época en que yo pensaba que se puede considerar la función ψ como de alguna manera una descripción directa de la realidad. En un extenso ensayo que acabo de escribir doy un ejemplo que es muy similar a tu barril de pólvora explosiva [...]

Confinado en una cámara de acero se prepara un contador Geiger con una pequeña cantidad de uranio, tan pequeña que en la hora siguiente es sólo tan probable esperar una desintegración atómica como no esperar ninguna. Un dispositivo amplificado hace que la primera desintegración atómica destruya una pequeña botella de ácido prúsico. Esto y —cruelmente— un gato está también en la cámara de acero. Según la función ψ , después de una hora, *sit venia verbo*, el gato vivo y el muerto se presentan en igual medida⁷⁰⁸

Este experimento mental del gato es, como el del barril de pólvora de Einstein, una analogía cuántica del ejemplo de la bola en la caja de Einstein. Como veremos, hay pocas diferencias entre este gato y el del artículo, que apareció en el mes de noviembre; tan solo detalles como que aquí el material radiactivo es uranio y no aparece el pintoresco mecanismo del martillo rompiendo el frasco ni la metáfora de la mezcla.

Y en su carta del 4 de setiembre Einstein escribía a Schrödinger:

tu gato muestra que estamos completamente de acuerdo en lo que se refiere a la valoración de la teoría actual. Una función ψ que contenga tanto el gato vivo como el muerto no puede tomarse como una descripción de un estado real de los hechos. Por el contrario, este ejemplo muestra exactamente que es razonable aceptar que la función ψ corresponda a un conjunto estadístico que contenga ambos sistemas, con gatos vivos y con gatos muertos⁷⁰⁹.

En el mes de noviembre Schrödinger publicó el artículo "La presente situación de la mecánica cuántica" en el que manifestaba, con su peculiar estilo directo y semiccoloquial que la aparición del trabajo EPR " había motivado el presente —¿diré informe o confesión general?"⁷¹⁰ El artículo de Schrödinger está escrito con toques de ironía, lo cual sugiere que su autor no consideraba

⁷⁰⁸A Fine, *Ibid.*, (p 83)

⁷⁰⁹A.Fine, *Ibid.*, (p. 84)

⁷¹⁰E.Schrödinger, "The present situation in Quantum Mechanics" en *Quantum Theory and Measurement*. J.A.Wheeler y W.H.Zurek. Princeton University Press. Princeton (1983) (p. 163)

satisfactoria la situación que presentaba en aquel momento la teoría que él mismo había contribuido a crear; el autor comienza exponiendo, de manera objetiva, no sesgada, la situación de la teoría para posteriormente mostrar “que la doctrina dominante está llena de deficiencias⁷¹¹”; pero el artículo también contiene interesantes aportaciones que muestran las líneas generales del pensamiento de su autor.

En primer lugar, Schrödinger explicaba que la física, sobre la base de los datos experimentales, crea *imágenes* o *modelos*, que son representaciones de los objetos naturales idealizadas o simplificadas para que el análisis matemático pueda aplicarse a ellas. Las consecuencias deducidas de tal análisis se contrastan a través de experimentos, los resultados de los cuales pueden llevar a la alteración del modelo. Schrödinger describía así el proceso:

Si en muchos y variados experimentos el objeto natural se comporta como el modelo, uno está feliz y piensa que la imagen se adapta a la realidad en características esenciales. Si no coincide,[...] no se dice que uno no deba estar feliz. Porque básicamente éste es el medio de gradualmente acercar nuestra representación, es decir, nuestro pensamiento a las realidades⁷¹²

Como vemos, Schrödinger, al describir la tarea del científico alude a la noción de realidad –como aparece en repetidas ocasiones a lo largo de este artículo, que fue motivado por EPR, en el que la noción de realidad física también es fundamental--, porque la noción de realidad física es un concepto útil para el progreso de la investigación, puesto que, con él, el científico siente que su trabajo contribuye al avance de la ciencia en su acercamiento a la Naturaleza.

A continuación, Schrödinger compara los modelos de la física clásica con los de la mecánica cuántica. Para ello ofrece el ejemplo del modelo de átomo de Rutherford, que consiste en dos masas puntuales. Para describirlo se pueden dar las coordenadas de estos puntos y sus componentes del momento. En física clásica se puede definir un estado del modelo ofreciendo los valores de estas variables, pero en mecánica cuántica éstos no pueden especificarse simultáneamente. Si se miden exactamente los valores de las coordenadas de la posición no se pueden determinar los valores de los componentes del momento, como consecuencia de la relación de indeterminación de Heisenberg; por esta razón se dice que la especificación de las variables en el modelo cuántico es

711E. Schrödinger, “The present situation in Quantum Mechanics”, *Ibid.*, (p. 154)

712E. Schrödinger, “The present situation in Quantum Mechanics”, *Ibid.*, (p. 152)

borrosa. “Pero la función de onda ψ define el estado del modelo de forma inequívoca y constituye un catálogo completo de las probabilidades de encontrar un resultado determinado en una medida realizada sobre el sistema físico para el cual se ha diseñado el modelo”⁷¹³ .

En el modelo cuántico, “cada una de sus partes determinantes puede, bajo ciertas circunstancias, convertirse en un objeto de interés y conseguir cierta realidad. Pero nunca todas ellas juntas –ahora éstas, ahora aquéllas,...Mientras tanto, ¿qué ocurre con las otras? Ellas no *tienen* realidad, quizás (perdón por la expresión) una realidad borrosa”⁷¹⁴. Así pues, vemos que Schrödinger argumenta en la línea de EPR⁷¹⁵.

Posteriormente, Schrödinger se dispone a atacar la interpretación de ψ según la cual ésta ofrece una completa especificación de un estado objetivamente borroso; según esta concepción la mecánica cuántica ofrece un modelo de la realidad, pero en este modelo la realidad aparece borrosa. Por esta razón Schrödinger se pregunta “¿Son las variables realmente borrosas?”; quiere considerar la cuestión de cómo entender las variables, es decir, los observables cuánticos, en los estados en los que éstos no tienen un valor propio, o sea, un valor exacto. A dicha cuestión Schrödinger responde que es posible:

expresar el grado y la clase de borrosidad de *todas* las variables en *un* concepto perfectamente *claro* [...] llamado función de onda, función ψ o vector del sistema [...] Es una construcción matemática abstracta y no intuitiva [...] En todos los hechos es una entidad imaginada que representa la borrosidad de todas las variables en cada momento tan claramente y fielmente como el modelo clásico hace sus exactos valores numéricos. A su ecuación del movimiento, la ley de su variación con el tiempo en cuanto no se altera el sistema, no le falta un ápice de la claridad y la determinación de las ecuaciones de movimiento del modelo clásico. Por tanto, el último podría ser directamente reemplazado por la función ψ , en cuanto que la borrosidad sea confinada a la escala atómica, no abierta al control directo [...] Pero serios malentendidos surgen si uno piensa que la incertidumbre afecta cosas macroscópicamente tangibles y visibles⁷¹⁶.

713W..Moore, *Ibid.*, (p.307)

714E. Schrödinger, “The present situation in Quantum Mechanics”, *Ibid.*, (p.155)

715En EPR el criterio de realidad es el siguiente: si se puede predecir con certeza el valor de una cantidad física existe un elemento de la realidad física correspondiente a esta cantidad física. Pero pensamos que este enunciado no es lógicamente equivalente al que parece que Schrödinger supone: si no se puede predecir con certeza el valor de una cantidad física no existe un elemento de la realidad física correspondiente a esta cantidad física.

Este tema se trata en el apartado de “La noción de realidad física en EPR” del capítulo dedicado a Einstein de este trabajo.

716E.Schrödinger, “The present situation in Quantum Mechanics”, *Ibid.*, (p.156)

A continuación, Schrödinger ofrece el ejemplo de un núcleo radiactivo; su estado es borroso, desdibujado, de manera que no se puede establecer el instante de desintegración ni la dirección en que la partícula α emitida abandona el núcleo. Esta partícula puede describirse de forma intuitiva, según Schrödinger, como una onda esférica que emana en todas las direcciones desde el núcleo.

Así, para Schrödinger, la descripción clásica, con sus valores exactos para las variables, puede ser sustituida por la función ψ en cuanto la borrosidad sea restringida a las dimensiones atómicas, puesto que hemos visto que ψ es una “construcción abstracta y no intuitiva” que representa la borrosidad de las variables en el mundo cuántico. Pero cuando se trata de los cuerpos del mundo macroscópico la noción de borrosidad ya no puede aplicarse. Y Schrödinger concluye esta sección con su famoso experimento mental:

Es posible imaginar situaciones completamente burlescas. Se encierra un gato en una caja de acero con el siguiente dispositivo diabólico (que hay que proteger cuidadosamente de todo contacto directo con el gato): se coloca un contador Geiger, una minúscula muestra de una sustancia radiactiva, tan minúscula que en el transcurso de una hora *quizás* se desintegre uno solo de sus átomos, pero con igual probabilidad quizás ninguno; en caso de desintegración, el contador crepita y acciona, a través de un dispositivo, un martillo que rompe una ampolla con ácido cianhídrico. Si se abandona este dispositivo durante una hora se podrá predecir que el gato está vivo, *si* durante este tiempo no se ha producido ninguna desintegración. La primera desintegración lo hubiera envenenado. La función ψ del conjunto lo expresaría de la forma siguiente: en ella el gato vivo y el gato muerto están (perdón por la expresión) mezclados o revueltos en proporciones iguales.

Schrödinger continua con la tesis que pretende defender con su experimento mental:

Es típico de estos casos que una indeterminación originalmente restringida al dominio atómico se ha transformado en una indeterminación macroscópica, que puede *resolve* por observación directa. Esto nos previene de aceptar de forma ingenua como válido un “modelo borroso” para representar la realidad... Hay diferencia entre una fotografía borrosa o desenfocada y una instantánea de nubes y bancos de niebla⁷¹⁷

Así, el experimento mental del gato de Schrödinger, como el de la pólvora de Einstein, se añadía a

717E. Schrödinger, “The present situation in Quantum Mechanics”, *Ibid.*, (p. 157)

los ejemplos y argumentos de EPR en contra de la completud de la mecánica cuántica⁷¹⁸. Este experimento mental ha tenido un gran impacto en las discusiones sobre los fundamentos conceptuales de la mecánica cuántica –Wigner, Everett–, sólo superado por el de EPR y, como éste, ha salido de su original contexto especializado para convertirse en tema de la imaginación popular.

En 1950, en una de sus últimas cartas a Schrödinger, Einstein rindió tributo a la correspondencia que mantuvieron durante el verano de 1935. Escribiendo sobre los “físicos contemporáneos” Einstein dijo:

De alguna manera creen que la teoría cuántica ofrece una descripción de la realidad e incluso una descripción *completa*; pero se refuta elegantemente esta interpretación con tu sistema de átomo radioactivo + Geiger + amplificador + CARGA DE POLVORA + gato en una caja, en que la función ψ del sistema contiene a la vez el gato vivo y reducido a pedazos⁷¹⁹.

5. EL ENTRELAZAMIENTO

En su artículo de 1935 Schrödinger presenta el fenómeno del entrelazamiento como el responsable de la paradoja del experimento mental del gato. Como hemos visto, parte de la situación del experimento EPR: si se tiene una función ψ , que él considera “un catálogo de expectativas” de dos cuerpos completamente separados, se tiene el máximo conocimiento para cada uno de ellos y, en ausencia de interacción entre ellos, también se tiene la máxima información para los dos cuerpos juntos. Pero, en cambio, manifiesta Schrödinger que:

El máximo conocimiento del sistema total no implica necesariamente el máximo conocimiento de todas sus partes, incluso si se separan completamente y en este momento no pueden influirse una sobre otra. Así puede suceder que una parte de lo que se conoce pueda pertenecer a relaciones o estipulaciones entre los dos subsistemas (nos limitaremos a dos), como sigue: si una medida particular en el primer

718 A. Fine piensa que en un principio Schrödinger usó el ejemplo del gato para ilustrar el problema de la medida; pero, posteriormente, la correspondencia con Einstein le llevó a convertirlo en un nuevo argumento a favor de la incompletud de la mecánica cuántica. *Ibid.*, (p.84). En cambio, M. Lockwood mantiene que el ejemplo del gato fue desde el principio usado por Schrödinger para responder a la pregunta de la completud, siguiendo la analogía de la bola en la caja de Einstein y el artículo EPR. Según Lockwood, Fine se basa en una nota escrita por Schrödinger entre paréntesis en una sección del artículo de 1935 que trata de la medida, donde manifiesta que el “catálogo de expectativas” que ofrece la función ψ para todo el sistema no es completo y entre paréntesis escribe “Recuerda aquel gato envenenado!” M. Lockwood en “¿Qué debía haber aprendido Schrödinger de su gato?” en *Erwin Schrödinger .Philosophy and the Birth of Quantum Mechanics*, edit M. Bitbol y O. Darrigol. Editions Frontieres.

719 A. Einstein, *Letters on Wave Mechanics*. New York: The Philosophical Library (1967) (p 39)

sistema ofrece el resultado entonces para una medida particular del segundo las estadísticas válidas de expectación son unas determinadas; pero si la medida en cuestión del primer sistema ha de tener otro resultado entonces hay otras expectativas para el segundo, si aparece un tercer resultado para el primero entonces se da otra expectativa para el segundo; y así sucesivamente [...]

Cualquier “entrelazamiento de predicciones” que tiene lugar obviamente puede volver al hecho de que los dos cuerpos formaron previamente en un sentido auténtico *un* sistema, que estuvo interactuando y dejó trazas en cada uno. Si dos cuerpos separados, cada uno de ellos conocido al máximo, entra en una situación en la que se influyen mutuamente y se separan de nuevo entonces allí se da lo que he llamado *entrelazamiento* de nuestro conocimiento de los dos cuerpos.⁷²⁰

Así, para describir esta característica esencial de la función ψ Schrödinger utilizó el término *Verschränkung* (cruzamiento) que él mismo tradujo al inglés por *Entanglement*, entrelazamiento. El entrelazamiento entre dos subsistemas (o cuerpos) surge como resultado de una interacción pasajera que en el pasado hubo entre ellos. Dicha interacción estableció una dependencia entre ellos que les impuso unas determinadas condiciones y hace que después de la interacción ya no sean independientes. Obviamente, si los cuerpos nunca han interactuado previamente no se dará ningún entrecruzamiento entre ellos.

Schrödinger considera que el entrelazamiento de las funciones de onda de dos sistemas separados que previamente han interactuado es la característica fundamental de la mecánica cuántica. El entrelazamiento es el responsable de que al efectuar una medida en uno de los sistemas se puedan utilizar las relaciones condicionales establecidas entre ellos para obtener el conocimiento del otro sistema. Así pues, la función de onda que representa un sistema depende del tipo de medida – posición o momento, por ejemplo-- realizado en el otro sistema. Por esta razón, en relación al experimento mental del gato, Schrödinger veía el entrelazamiento como el responsable de la paradoja, porque el gato (con el aparato que le podía matar) estaba entrelazado con la fuente radiactiva (que accionaba el aparato que le podía matar).

6. LA NOCIÓN DE SALTO CUÁNTICO

Para Schrödinger uno de los mayores éxitos de su teoría era la posibilidad de ofrecer una

720E. Schrödinger, “The present situation in Quantum Mechanics” *Ibid.*, (p.160)

explicación de los llamados “saltos cuánticos”. Comparaba la noción de los “saltos cuánticos” con la de los “epiciclos”⁷²¹, porque, según él, eran también “ingeniosas construcciones de la mente humana que dieron una descripción sumamente exacta de los hechos observados pero que han perdido todo su interés, excepto para los historiadores”.

A Bohr la noción de los saltos cuánticos le había permitido, “con gran ingenuidad”, explicar cuantitativamente algunos de los espectros lineales atómicos, que eran claramente discretos y que habían provocado una gran confusión entre los físicos. Pero, según Schrödinger, el hecho de que la teoría de Bohr había alcanzado éxitos “genuinos y maravillosos” había impedido que se viera su gran deficiencia. ¿Cuál era esta gran deficiencia? ¿Por qué le repelían a Schrödinger los saltos cuánticos?⁷²²

La teoría de Bohr describía minuciosamente los llamados estados “estacionarios” que el átomo tenía normalmente, en los períodos en que *nada ocurre*, pero no decía nada sobre los períodos de transición, sobre los denominados “saltos cuánticos”. Y ya que los estados intermedios no estaban permitidos, se había de considerar que la transición era instantánea; además, la radiación de un tren de ondas de 3 o 4 pies de longitud, como se observa en un interferómetro, consumía el intervalo medio de tiempo entre las dos transiciones, por consiguiente, no sin dejaba tiempo al átomo para permanecer en aquellos estados estacionarios, los únicos de los cuales la teoría ofrecía una descripción.

Esta dificultad, según Schrödinger, era superada por su mecánica de ondas, que ofrecía una nueva descripción de los *estados*. Esta teoría no abandonaba la discontinuidad previamente admitida, pero

cambió de los *estados* a algo más que puede entenderse más fácilmente por el símil de una cuerda que vibra o la piel de un tambor o la lámina de metal o una campana que tañe. Si se golpea, este cuerpo es un sistema que vibra, es decir, se deforma suavemente y después corre en rápida sucesión a través de una serie continua de suaves deformaciones una y otra vez. Hay, desde luego, una variedad infinita de maneras de golpear un cuerpo dado, sea una campana, por un instrumento duro o blando, afilado o romo, en diferentes o en varios puntos en un momento dado. Esto produce una variedad infinita de deformaciones iniciales y, de acuerdo con ellas, una variedad realmente infinita de formas de la

721E. Schrödinger, “Are there Quantum Jumps” *The British Journal for the Philosophy of Science*, August (1952) Volume III, N° 10, (p.112)

722Schrödinger hablaba de los “terribles saltos en las órbitas de Bohr” en una carta a A.Eddington en 1940

consiguiente vibración [...] Pero, en cada caso, por muy complicado que sea el movimiento real, puede ser matemáticamente analizado como la *superposición* de una serie discreta de comparativamente simples “vibraciones propias”, cada una de las cuales continua con una frecuencia completamente definida. Esta serie discreta de frecuencias depende de la forma y el material del cuerpo, de su densidad y de sus propiedades elásticas⁷²³

Así, la mecánica de ondas de Schrödinger ofrecía una imagen general que seguía el modelo de comportamiento de los cuerpos elásticos. En esta imagen, cualquier estado de cualquier sistema podía considerarse como una superposición de algunos de sus modos propios (= estados de pura energía) y los estados estacionarios de la teoría de Bohr tomaban el rol de las vibraciones propias; sus niveles discretos de energía desempeñaban la función de las frecuencias propias de dichas vibraciones propias y las frecuencias radiadas, que se observaban en los espectros de líneas, eran iguales a las diferencias de las frecuencias propias. La nueva teoría admitía estados intermedios entre los estados “estacionarios” sin dejar de explicar la discreción de los “niveles de energía”, porque se habían transformado en frecuencias propias. La nueva teoría eliminaba el privilegio de los estados estacionarios. Un sistema mecánico de ondas no tenía ninguna predilección, según Schrödinger, por ser afectado por sólo uno de sus modos propios en un momento determinado.

Esta manera de pensar provenía, según Schrödinger, del éxito de la idea de los paquetes de energía por el cual nos habíamos habituado a pensar que el producto de la constante de Planck h por la frecuencia era un paquete de energía, perdida por un sistema y ganada por otro. ¿Cómo se podía explicar la transición de estados, según Schrödinger? Como un fenómeno que él llamaba de una peculiar “resonancia”. Se habían de mirar las frecuencias como sólo frecuencias y se había de abandonar la idea de los paquetes de energía.

Según Schrödinger, el término “energía” se usaba con dos significados completamente diferentes, el macroscópico y el microscópico. No aceptaba el segundo, puesto que no consideraba que en cada caso concreto de interacción microscópica se intercambiara una porción completa $h\nu$ de energía macroscópica. Veía la interacción como un fenómeno continuo. Aunque Schrödinger aceptaba logros de la teoría de los paquetes de energía, como la explicación de Planck y Einstein del equilibrio de la energía macroscópica entre la radiación y la materia, no aceptaba, en cambio, el “esquema simplificado de estados de energía exactos o nítidos y de transiciones abruptas”⁷²⁴ y estaba

⁷²³E. Schrödinger, “Are there Quantum Jumps?” *Ibid.*, (p.113)

⁷²⁴E. Schrödinger, “Are there Quantum Jumps?” *Ibid.*, (p.120)

plenamente convencido de que la idea de los misteriosos saltos era supeflua e innecesaria.

Así escribía Schrödinger:

Teníamos la confianza de que la misteriosa “teoría de ataque y sacudida”⁷²⁵ sobre las transiciones de tipo salto desde un nivel de energía a otro sería abandonada. Esperábamos que nuestras ecuaciones describieran cualquier cambio de esta clase como procesos lentos y realmente *describibles*. Esta esperanza no era debida a una predilección personal por la descripción continua sino por el deseo de cualquier clase de descripción de estos cambios. Era una terrible necesidad. Producir un tren coherente de ondas de luz de 100 cm de longitud y más, como se observa en las finas líneas espectrales, toma un tiempo, comparable al intervalo medio entre transiciones. La transición ha de ser emparejada con la producción de un tren de ondas. Por tanto, si no se entiende la transición, sino sólo se entienden los “estados estacionarios”, no se entiende nada⁷²⁶.

Schrödinger deseaba describir la transición entre un estado y otro; no se podía resignar a pensar que el átomo saltaba de un estado a otro sin ninguna razón. Necesitaba entender el porqué. No comprendía cómo muchos físicos se habían conformado sin ninguna explicación. Incluso hablaba, hemos visto, de “cualquier clase de descripción”. La descripción era una necesidad para él. No comprendía por qué muchos físicos se habían resignado a no entender, si el objetivo del científico, desde los físicos presocráticos, siempre había sido entender los cambios. Los filósofos de Jonia pretendían entender lo que veían claramente en la naturaleza con sus propios ojos (por ejemplo, la solidificación y la evaporización del agua). Schrödinger, 2500 años después, también pretendía entender lo que veía con sus propios ojos en el laboratorio, las líneas espectrales

Así, la explicación que proponía Schrödinger era la siguiente:

Los sistemas microscópicos se rigen por una ley de resonancia, que requiere que la diferencia de dos frecuencias propias de un sistema sea igual a la diferencia de dos frecuencias propias del otro sistema

$$\nu_1 - \nu'_1 = \nu'_2 - \nu_2$$

⁷²⁵ *Fit and jerk theory*

⁷²⁶E. Schrödinger “The meaning of Wave Mechanics”. *Gesammelte Abhandlungen*. Vol. 3. Österreichische Akademie der Wissenschaften (1984) Viena (p.696)

que es equivalente a

$$v_1 + v_2 = v'_1 + v'_2$$

es decir, la suma de las frecuencias de las vibraciones antes de la interacción es igual a la suma de las frecuencias de las vibraciones después de la interacción.

Según Schrödinger⁷²⁷, la interacción se podía describir adecuadamente como un cambio gradual, no repentino de las cuatro vibraciones propias que se daban en la interacción. Habíamos de dejar de pensar que el sistema 1 descendía del nivel de energía hv_1 al hv'_1 y su pérdida de energía permitía al sistema 2 subir del nivel hv_2 al hv'_2 . Esta interpretación no era adecuada porque no tenía en cuenta el principio de superposición, que nos permitía concebir los cambios graduales simultáneos de algunas y de todas las amplitudes sin abandonar la discontinuidad esencial de las frecuencias. Simplemente cuando los sistemas vibrantes entraban en contacto cambiaban sus modos de vibración. Schrödinger reconocía que la suma de frecuencias no era una noción familiar pero era una consecuencia inevitable de su teoría. Para ayudarnos a entender este concepto nos proponía como ilustración una situación de nuestra vida diaria en la que sumamos frecuencias: "Si fumo 25 cigarrillos al día, mi mujer fuma 10 y mi hija fuma 12-- no es el consumo familiar 47 por día-- en promedio?"⁷²⁸

En síntesis, según Schrödinger, con su explicación por "resonancia" no era necesario aceptar la existencia de lo que él consideraba misteriosos saltos cuánticos

7. LA NOCIÓN DE PARTÍCULA ELEMENTAL

Para Schrödinger la mecánica cuántica constituía el atomismo del siglo XX, un atomismo que había ampliado el ámbito de sus nociones para abarcar, además de la materia, toda clase de radiación. Los "átomos" de este nuevo atomismo eran los electrones, los protones, los fotones, etc, cuyo nombre genérico es el de partículas elementales⁷²⁹. Schrödinger sometió a un análisis riguroso el concepto

727E. Schrödinger en el Coloquio de Julio de 1952 en E. Schrödinger, *The interpretation of Quantum Mechanics*, editado por M. Bitbol. Ox Bow Press. Woodbridge, Connecticut (1995), (p.115) (p.25-6)

728 E. Schrödinger, *The interpretation of Quantum Mechanics*, *Ibid.*, (p.116)

729 Así, el nuevo atomismo abarcaba todas las formas de energía, una de las cuales era la materia física

de partícula elemental en su ensayo titulado *¿Qué es una partícula elemental?*⁷³⁰ publicado en 1952. En él la tesis que Schrödinger defiende es que con la mecánica cuántica la noción de partícula elemental ha perdido las características esenciales que tenía en la física anterior, puesto que en la nueva concepción la partícula “carece de identidad”, es decir, ya no es un individuo que se le pueda identificar como tal.

Esta alteración en la noción de partícula forma parte del gran cambio que ejerció la mecánica cuántica en nuestra imagen del mundo físico. Se había asumido que la distinción entre partículas y ondas era obvia, tan clara como la diferencia que vemos entre un violín y su sonido. Pero, según Schrödinger, con la mecánica cuántica esta distinción se desvaneció, porque se descubrió que las partículas tienen propiedades ondulatorias y las ondas tienen propiedades corpusculares. Si en ocasiones se percibía la naturaleza de onda y en ocasiones se percibía la naturaleza de partícula de un mismo objeto, ello no era debido al objeto sino al aparato experimental con el que se lo observaba. Así, por ejemplo, un haz de rayos catódicos en una cámara de Wilson producía líneas rectas, aisladas, de gotitas de agua; pero si se aplicaba un campo magnético, entonces los electrones se desviaban y las líneas eran curvas. Interpretamos dichas líneas como huellas del recorrido de electrones individuales. Sin embargo, si el mismo conjunto de rayos catódicos atravesaba un tubo que contenía polvo de cristal entonces producía en una placa fotográfica un diseño de círculos concéntricos, que interpretamos como muestras de la interferencia de ondas. Como estos círculos son tan similares a los que presentan los rayos X cabe incluso preguntarse si no corresponden a rayos X en lugar de corresponder a rayos catódicos. Pero la sospecha se desvanece cuando se observa que todo el sistema de círculos puede ser desplazado por un imán, lo que nunca ocurre con los rayos X.

Así, hay gran cantidad de evidencias experimentales que muestran que las características de onda y las de partícula van unidas y, por tanto, constituyen diferentes aspectos de la misma realidad. El problema conceptual que se plantea consiste en explicar cómo se mantienen unidos estos dos aspectos. La escuela de Copenhague sigue la interpretación de Born, según la cual todas las ondas han de ser consideradas como “ondas de probabilidad”. En consecuencia, la onda para dicha escuela no se ha de representar como verdadera onda, puesto que sólo constituye una construcción matemática para calcular la probabilidad de encontrar la partícula en ciertas condiciones. Pero según Schrödinger hay que tener en cuenta que

⁷³⁰E. Schrödinger “¿Qué es una partícula elemental?” en *¿Qué es una ley de la Naturaleza?* Fondo de Cultura Económica. México (1975) (p 164)

Algo que influye sobre el comportamiento físico de otra cosa por ningún motivo puede llamarse menos real que ese “algo” sobre el que influye, sea cual fuere el significado que estemos dando al peligroso epíteto “real”. Sin duda es útil recordar de vez en cuando que todos los modelos cuantitativos o imágenes de la física son, epistemológicamente, tan sólo construcciones matemáticas para computar los hechos perceptibles; pero yo no veo que esto se aplique más a las ondas de la luz que, por ejemplo, a las moléculas de oxígeno⁷³¹

La alteración de la noción de partícula que realizó la mecánica cuántica está directamente relacionada con la relación de incertidumbre de Heisenberg. Una manera de llegar a esta relación es analizar el procedimiento experimental que nos lleva a determinar la localización o la velocidad de la partícula porque para realizar cada una de estas medidas se da una transferencia de energía entre la partícula y el instrumento de medida. Esta transferencia de energía es una interferencia física del aparato con la partícula. Y dicha transferencia constituye una perturbación que no puede llegar a ser nula, porque la energía siempre se intercambia en porciones, que nunca son nulas. Pero, si reflexionamos más profundamente, vemos que al decir que perturbamos una cantidad física mensurable estamos implicando que ésta tiene unos valores antes y otros después de la interferencia. Si mantenemos que la onda es una guía, Schrödinger plantea la pregunta ¿cómo habría de guiar a la partícula en su camino, si no tiene camino alguno? Si mantenemos que la onda indica la probabilidad de encontrar la partícula en una posición ello implica que la partícula “se halla en uno y sólo uno de estos lugares”⁷³²

Aquí vemos cómo Schrödinger no acepta ni la concepción de de Broglie de onda-guía ni la de Born de onda como probabilidad, concepción seguida por la escuela de Copenhague. Según esta última, cuando creemos que medimos la partícula en un punto no queremos decir que ésta ya estaba allí sino sólo que la encontramos allí, puesto que bajo un punto de vista positivista no hay que distinguir entre el conocimiento que podemos obtener de un objeto físico y su verdadero estado, porque en realidad son lo mismo.

Pero Schrödinger no aceptaba esta perspectiva positivista. Según él, ningún descubrimiento de la física –ni de la mecánica cuántica, por muy revolucionario que éste sea-- nos lleva a renunciar a la representación del mundo físico como una realidad. La ciencia ha de seguir buscando una verdadera comprensión del mundo, a pesar de que la relación de incertidumbre nos haya reducido la cantidad

731E. Schrödinger “¿Qué es una partícula elemental?” *Ibid.*, (p. 169)

732E. Schrödinger, “¿Qué es una partícula elemental?” *Ibid.*, (p.172)

de información que podemos recabar de una partícula. Hemos de pensar que estudiamos lo que realmente ocurre en la naturaleza, porque pensar que el mundo físico es una realidad ha sido y es una concepción útil en la vida cotidiana y en la historia de la ciencia. Todos la usamos cada día, incluso “aquellos filósofos que se le opusieron en teoría, como el obispo Berkeley”⁷³³.

El debate filosófico sobre la realidad del mundo no interesa al físico, porque éste necesita seguir asumiendo el realismo que aceptamos en nuestra vida diaria y continuar la percepción de nuestra experiencia cotidiana por medios mucho más sutiles y elaborados. La física no ha de entrar en un ámbito⁷³⁴ que no le pertenece, por las características propias que ésta tiene por su carácter de disciplina científica⁷³⁵.

En la imagen del mundo que representa la mecánica cuántica la partícula no es un objeto absolutamente identificable, un ente concreto, es decir, no dispone del carácter de individualidad que otorgamos a una pieza de materia en la vida ordinaria. Ello se muestra en la estadística, en la naturaleza y el número de las distribuciones que es posible hacer con las llamadas partículas elementales. Para que entendamos la diferencia entre las estadísticas más conocidas, Schrödinger ofrece como ilustración la siguiente analogía⁷³⁶. Un profesor tiene dos premios para distribuir entre tres escolares y antes de hacerlo quiere asegurarse de cuántas maneras diferentes puede hacerlo. El profesor quiere conocer el número de las distribuciones posibles. Y éste depende de la naturaleza de los premios. En la primera estadística las recompensas son dos medallas conmemorativas, una con la imagen de Newton y la otra con la de Shakespeare. En la segunda estadística las recompensas son dos monedas iguales. Y en la tercera estadística las recompensas consisten en dos puestos vacantes en el equipo de fútbol de la escuela. Si las recompensas representan las partículas y los chicos representan sus estados posibles, el primer caso lleva a nueve distribuciones diferentes. Corresponde a la estadística de Boltzmann. El segundo lleva a seis distribuciones diferentes, porque las monedas son intercambiables. Corresponde a la estadística de Bose-Einstein. El tercero lleva a tres distribuciones diferentes, porque no tiene sentido ofrecer a un escolar dos vacantes en el equipo de fútbol. Corresponde a la estadística de Fermi-Dirac.

733E. Schrödinger, “¿Qué es una partícula elemental?” *Ibid.*, (p 173)

734A pesar de que Schrödinger meditó y escribió mucho sobre metafísica, lo hizo más como persona que como físico, puesto que en sus escritos encontramos que cuando trata de los temas más abstractos, como el monismo, no alude a los descubrimientos de la mecánica cuántica, aunque sí se refiere a ellos en los numerosos ensayos en que reflexiona sobre la imagen general que del mundo ofrece la ciencia.

735Que veremos en el próximo apartado sobre la imagen del mundo que ofrece la ciencia natural.

736E. Schrödinger “¿Qué es una partícula elemental?” en *¿Qué es una ley de la Naturaleza? Ibid.*, (p 182).

Las pruebas experimentales muestran que las llamadas partículas elementales no siguen la estadística de Boltzmann sino la de Bose-Einstein, que se aplica, por ejemplo, a los fotones, o la de Fermi-Dirac, que se aplica, por ejemplo, a los electrones. Así, los fotones son cuantos de luz, es decir, energía electromagnética, que siempre se la ha considerado como poseedora de cantidad, pero no de individualidad. Y del comportamiento estadístico de los electrones tampoco se sigue que éstos sean cosas identificables. Analicemos el comportamiento de los electrones. En primer lugar, los posibles estados de un electrón no están absolutamente definidos sino que dependen de la disposición del experimento. En segundo lugar, los electrones siguen un orden por el cual siempre que un estado ocupado deja de estar ocupado un estado vecino queda ocupado. Esto explica que en determinadas condiciones puedan producirse largas cadenas de estados ocupados, que producen en el observador la impresión de individuos identificables, como en el caso de cualquier objeto de los que diariamente nos rodean⁷³⁷. Así, suponemos que las descargas de los contadores Geiger colocados en línea son causadas por la misma partícula que pasa de un contador a otro. En consecuencia, la partícula nos produce la ilusión de tener una individualidad, como si fuera un objeto de la vida ordinaria, mas, estando sujeta al principio de incertidumbre, realmente no lo es. En conclusión, puede ser práctico seguir usando el término partícula, pero no hay que olvidar que la identidad de la partícula no es un concepto absoluto; es un término relativo que depende del contexto en el que se utilice.

7. LA INFLUENCIA DE MACH

Como tantos científicos y pensadores de la época, Schrödinger recibió una gran influencia de E. Mach. Y, como Einstein, también se alejó del ideario de éste en algunos puntos –la función de la ciencia, el papel de la metafísica–, pero en otros puntos mantuvo su influencia durante toda la vida – el monismo, por ejemplo–.

En la Viena en que vivió el joven Schrödinger, Mach era muy popular; era un físico de reconocido prestigio y su estilo filosófico era muy claro. Así Schrödinger manifestaba que fue educado en una ciudad donde la personalidad de Mach impregnaba la atmósfera y que leyó prácticamente todo lo

⁷³⁷Como aparece en el apartado dedicado al monismo, Schrödinger sigue a E. Mach y a B. Russell en su explicación de cómo nos formamos la idea de la individualidad de un objeto, que persite aunque no lo percibamos directamente, puesto que suplementamos las percepciones que nos faltan con las que hemos tenido en algún momento y suponemos que siguen existiendo

que éste había escrito⁷³⁸. A pesar de la batalla que Mach mantenía con Boltzmann por la realidad de los átomos, Schrödinger, como muchos de los físicos del momento en Viena, combinaba, en su trabajo diario, las ideas filosóficas del primero con los métodos del segundo y lo explicaba así:

Tanto Boltzman como Mach estaban tan interesados en filosofía, especialmente en epistemología, como en física; en efecto, todos sus últimos escritos estaban impregnados de una perspectiva epistemológica. Sus puntos de vista no eran los mismos. Pero llenos de gran admiración por la cándida e incorruptible lucha por la verdad de cada uno de ellos, no los considerábamos irreconciliables. El ideal de Boltzmann consistía en formar detalladas “imágenes” absolutamente claras, casi elementalmente claras – principalmente para estar seguros de evitar supuestos contradictorios. El ideal de Mach era la cauta síntesis de hechos observacionales que pueden, si se desea, ser llevados de nuevo a la llana y cruda percepción sensorial [...] No obstante, decidimos por nosotros mismos que eran diferentes métodos de ataque y que podíamos seguir uno de los dos, teniendo en cuenta el no perder de vista los principios importantes [...] del otro⁷³⁹

A Mach se le considera el Hume del siglo XIX⁷⁴⁰. Su epistemología era positivista. Veámosla. Según Mach, todas nuestras percepciones se pueden descomponer en “elementos” que no son indivisibles, colores, sonidos, presiones, olores, espacio, tiempo etc... Todo lo que conocemos del mundo son los elementos, que son las partes constitutivas, “que hasta ahora no hemos podido dividir”⁷⁴¹, de complejos de colores, sonidos, presiones, etc,... ”enlazados en funciones espaciales y temporales”. Así, los elementos de Mach constituyen lo que habitualmente conocemos como sensaciones. De esta forma resume Mach su pensamiento: ”Los fenómenos pueden dividirse en elementos, que en cuanto los unimos a determinados procesos del cuerpo y los consideramos condicionados por ellos, los llamamos sensaciones”⁷⁴².

Mach distinguía tres nociones que constituyen el núcleo de su pensamiento:

Los complejos de elementos (colores, sonidos, presiones,etc) son lo que consideramos las cosas del mundo material, la totalidad de los cuerpos físicos; Mach los representaba con las letras ABC. El

738 Carta de Schrödinger a Eddington, escrita en 1940, de E. Schrödinger, *The Interpretation of Quantum Mechanics*. Ox Bow Press. Woodbridge, (p.121)

739 Carta de Schrödinger a Eddington, escrita en 1940, citada por Moore en *Ibid.*, (p. 41) y publicada, en parte, en E. Schrödinger, “The Interpretation of Quantum Mechanics”, *Ibid.*

740 “Mi punto de partida no es esencialmente distinto del de Hume” escribe E.Mach en su *Análisis de las sensaciones*, Editorial Alta fulla. Barcelona (1987), (p. 42)

741 E. Mach, *Análisis de las sensaciones*, *Ibid.*, (p. 5)

742 E. Mach, *Ibid.*, nota a pie de pagina de p. 15

complejo concreto de elementos que consideramos que es nuestro cuerpo, y que sólo es una parte de ABC, Mach lo representaba con las letras KLM y el complejo de elementos que constituyen nuestra vida psíquica, es decir, “el complejo de voluntad, imágenes mnemónicas, etc.”⁷⁴³ (dolor, placer, sentimientos, etc.) lo representaba con las letras griegas $\alpha\beta\gamma$.

Nos hemos habituado a considerar que las propiedades de las cosas ABC son efectos que parten de unos núcleos permanentes (por ejemplo, la punta de un lápiz que nos pincha) y llegan a nuestro yo, a $\alpha\beta\gamma$, por mediación del cuerpo KLM y los llamamos sensaciones. Pero si examinamos detenidamente la situación que muestra el esquema machiano vemos que realmente sólo tenemos noticia de estas sensaciones. Y como Mach sigue el principio de economía, según el cual “sólo tiene importancia para nosotros la relación de lo observable, lo dado, y todo lo hipotético, metafísico y ocioso ha de ser eliminado”⁷⁴⁴ como superfluo, llega a la conclusión de que “el mundo sólo consiste en sensaciones”⁷⁴⁵ (por ejemplo, ya que el sol cuando se pone, al atardecer, se ve como una superficie circular, plana, de color anaranjado se le puede definir como una sensación anaranjada circular).

Es ésta una conclusión que el mismo Mach admite que asusta cuando se oye por primera vez. Pero si se reflexiona más profundamente se ve también que los objetos de ABC están siempre condicionados por nuestro cuerpo KLM, es decir, sus propiedades aparecen modificadas por él; por ejemplo, un dado parece grande si lo tenemos cerca, pequeño si lo tenemos lejos y parece que no exista si cerramos los ojos; un palo que en el aire vemos recto si lo sumergimos en el agua lo vemos quebrado; es decir, lo que consideramos un mismo objeto se nos aparece como distinto según nuestros sentidos; porque los sentidos de nuestro cuerpo nos dan en diferentes circunstancias diferentes sensaciones ¿Dónde está, pues, la supuesta identidad del objeto? se pregunta Mach.

Así, la epistemología positivista de Mach le lleva a una ontología monista⁷⁴⁶. Sólo existen los elementos; no hay otro mundo detrás de él, ni material ni psicológico. No podemos establecer distinción alguna entre mundo real y mundo percibido. El mundo material consiste en elementos que, a su vez, son sensaciones, es decir, elementos del mundo psíquico. Propiamente hablando, sólo

743E.Mach, *Ibid.*, (p. 19)

744E Mach, *Ibid.*, (p. 25)

745E.Mach, *Ibid.*, (p. 11)

746Porque para Mach hay un solo tipo de realidad. Además el monismo de Mach puede calificarse de “neutral” porque, según él, los fenómenos son neutros, en el sentido de que no existe diferencia entre los fenómenos físicos y los fenómenos psíquicos.

hay una clase de elementos. No hay ninguna sensación a la cual corresponda algo fuera de ella misma. Por tanto, toda la realidad es una, no hay dos realidades de características opuestas, como se había creído tradicionalmente⁷⁴⁷. Vemos a nuestro alrededor continuamente elementos y en ellos no se pueden marcar los límites entre lo que son los cuerpos y lo que son las mentes. "No existe abismo alguno entre lo físico y lo psíquico"⁷⁴⁸, entre exterior e interior, mundo espiritual y mundo material. Lo físico y lo psíquico contienen elementos comunes; así, por ejemplo, observamos que típicos contenidos psíquicos como recuerdos, sentimientos, voliciones y conceptos están formados de trazas dejadas por sensaciones.

Sólo se puede conservar la separación tradicional si seguimos la manera estereotipada de pensar. Así, hacemos Física cuando investigamos, haciendo abstracción de nuestro yo, las relaciones de las cosas; pero hacemos Psicología cuando investigamos nuestro yo. Por ejemplo, un color es un objeto físico en cuanto lo consideramos como dependiente de la fuente luminosa; pero si lo pensamos como dependiente de nuestra retina entonces es un objeto psicológico.

Nuestro cuerpo es sólo una parte del mundo material, como cualquier otro cuerpo. Diferentes grupos de elementos son designados como cuerpos. Pero, en realidad, no existe un cuerpo aislado; es una ficción; así como no existe el yo, que es también una ficción⁷⁴⁹. La noción kantiana de "cosa en sí", que es incognoscible, no tiene tampoco ningún sentido porque es completamente superflua. No nos interesa, no nos sirve, porque está fuera de los límites del yo, que nunca podremos franquear

⁷⁵⁰

Por otra parte, la noción de materia es simplemente una idea simbólica que se otorga a un complejo relativamente estable de elementos sensibles⁷⁵¹. Nos forjamos la idea de materia, así como las ideas de las diferentes sustancias, cuando damos estabilidad a un complejo de elementos considerándolos siempre presentes, tanto si los observamos con los sentidos como si no los observamos (por ejemplo, la luna y el sol). Mas la estabilidad incondicionada no existe. Sólo la creamos cuando prescindimos de las condiciones. "Ni la materia ni la sustancia son estables incondicionados"⁷⁵², son simplemente composiciones regulares de sensaciones. Pero no hay que

747 Posiblemente por el peso de pensadores tan influyentes en Occidente como Platón y Descartes.

748 E. Mach, *Análisis de las sensaciones*, *Ibid.*, (p. 274)

749 E. Mach, *Conocimiento y error*, Editorial Espasa-Calpe, Buenos Aires (1948), (p. 26)

750 Mach llega a calificarla de "monstruosa" en *Conocimiento y error*, *Ibid.*, (p. 24)

751 Y la noción de átomo es también una idea simbólica de la experiencia, creada por economía

752 E. Mach, *Análisis de las sensaciones*, *Ibid.*, (p. 292)

abolirlas puesto que son útiles, se han creado instintivamente para unos fines prácticos que indudablemente han cumplido a través de los siglos. Para ello tan solo hay que depurarlas de forma crítica; tan solo hay que eliminar su carácter metafísico y convertirlo en empírico.

El yo es un continuo de contenidos, de elementos, que delimitamos de forma precisa respecto a los otros yoes, pero estos elementos no son inmutables sino que van cambiando a lo largo de la vida del individuo, dentro de la continuidad de ser observados en el mismo individuo.⁷⁵³ Pero el yo no está aislado. Forma parte de una comunidad de yoes. Sin embargo, no me es posible conocer el yo de mi vecino. No puedo observar directamente los otros yoes. Pero, por analogía, creo que también sienten deseos, voliciones y sentimientos como los que yo siento. Por la manera de actuar de las otras personas, pienso que para ellas mi cuerpo y el de otras personas están presentes, como para mí lo están sus cuerpos y los de otros. Infiero la naturaleza de los otros por un razonamiento de analogía, basado en la similitud entre su forma de actuar y la mía; por esta razón, supongo que sus contenidos de conciencia son como los míos. Así pues, yo deduzco sus deseos, sus sentimientos, sus recuerdos,[...] por sus actuaciones. Y de la misma manera mis deseos, mis sentimientos, mis recuerdos,[...] sólo son, para los otros, conclusiones inferidas de sus razonamientos por analogía⁷⁵⁴ A partir de mi forma de actuar ellos suponen en mí unas sensaciones similares a las suyas.

Estas consideraciones sirven a Mach también para distinguir lo que se considera físico de lo que se considera psíquico: lo primero está inmediatamente en el espacio dado a todos y, en cambio, lo segundo es dado sólo a uno mismo y a los otros sólo les es permitido conocerlo por analogía. Y ¿por qué puedo hacer esta analogía? Porque la conducta de los otros me obliga a admitir que sus percepciones se asemejan a las mías.

Según el mismo Mach, su pensamiento es básicamente como el de Avenarius; la única diferencia que hay entre ellos es el estilo de exposición; éste es más opaco, más complejo, más filosófico; en cambio, Mach confiesa que él no es filósofo, sino “naturalista”⁷⁵⁵. Su interés por la filosofía es sólo debido al hecho de que él “busca un punto de vista filosófico seguro y claro que proporcione

753 Mas también hay contenidos que trascienden a los límites del individuo particular en cuanto adquieren un carácter suprapersonal, general, independiente de la persona que los ha sacado a la luz; por ejemplo, ideas éticas y conceptos matemáticos universales.

754 E. Mach, *Conocimiento y error*, *Ibid.*, (p. 20)

755 E. Mach, *Análisis de las sensaciones*, *Ibid.*, (p. 43)

caminos accesibles, limpios de toda confusión metafísica⁷⁵⁶ que permitan el progreso de la ciencia⁷⁵⁷. Considera que la especulación metafísica conlleva el peligro de introducir subrepticamente contenidos oscuros e imaginativos, no avalados por la observación de los hechos. Su precaución le lleva a declarar que el objetivo de la ciencia es la exposición económica de los hechos. Cuanto más económica mejor, porque tiene menos contenidos superfluos—no exigidos por los hechos observables—, que pueden llevar a error. Lo más deseable es suponer el menor número posible de entidades, porque así es menor el riesgo de creer en entidades que no existen. Para Mach el ideal de ciencia contiene y anticipa el de Kirchhoff, según el cual la ciencia sólo busca “la más simple y completa” descripción posible de los hechos; esta concepción fue desarrollada también por Avenarius y, según Mach, se remonta incluso a Newton.

Por otra parte, “a mi alrededor veo que las cosas que puedo observar *dependen unas de las otras*”⁷⁵⁸ Por ejemplo, un cuerpo se calienta cuando está cerca del fuego y se enfría cuando está en contacto con el hielo. Por esta razón, la mejor exposición económica de los hechos que puede dar la ciencia es “la dependencia funcional, en sentido matemático, de los elementos”⁷⁵⁹ entre sí. Cuando se pueden caracterizar los hechos por magnitudes mensurables, la noción de función (por ejemplo $PV/T = \text{constante}$) permite representar las relaciones entre elementos mucho mejor que la tradicional noción de causa⁷⁶⁰, que es más imprecisa, porque para Mach la *causa* es simplemente “un acontecimiento al cual está ligado otro acontecimiento”⁷⁶¹ al que llamamos *efecto*.

Mas para estudiar muchos elementos que dependen unos de otros hay, según Mach, “*un solo método: el método de las variaciones*”, que consiste en observar para cada elemento la variación que va unida a la alteración de cada uno de los otros elementos. “Estas relaciones serán descubiertas por la *observación*” y la “*experimentación*”⁷⁶² y y, por tanto, no se requiere salir de la información que nos es dada empíricamente, es decir, no hay necesidad de ninguna consideración de carácter

756E. Mach, *Análisis de las sensaciones, Ibid.*, (p.43)

757Según el propio Mach sus consideraciones no hacen ninguna aportación significativa a la filosofía, porque sólo llevan al científico a apartar los pseudo-problemas que lo pueden perturbar, puesto que simplemente le ofrecen una *regla negativa* para su investigación. Por esta razón, al científico no le ha de importar que sus representaciones concuerden “o no con tal o cual sistema filosófico: lo esencial es que pueda utilizarlas de forma ventajosa como punto de partida de sus investigaciones. *Conocimiento y error, Ibid.*, (p. 26). Esta promiscuidad filosófica, esta ausencia de compromiso con un sistema filosófico, la encontramos en los trabajos de Einstein y de Schrödinger – ámbos con notable influencia de Mach.

758E. Mach, *Conocimiento y error, Ibid.*, (p 21)

759E. Mach, *Conocimiento y error, Ibid.*, (p 24)

760Para Mach no se puede probar ni la tesis determinista ni la indeterminista pero ello no afecta a los científicos, que cuando investigan “son forzosamente deterministas”, *Conocimiento y error, Ibid.*, (p 221)

761E. Mach, *Conocimiento y error, Ibid.*, (p 218)

762E. Mach, *Conocimiento y error, Ibid.*, (p.28)

metafísico.

9. ACTITUD DE SCHRÖDINGER ANTE LA METAFÍSICA

Schrödinger, en cambio⁷⁶³, aconsejaba⁷⁶⁴ no prescindir de la metafísica⁷⁶⁵ y enfrentaba, como vamos a ver, el positivismo⁷⁶⁶ de Mach a la metafísica. Schrödinger admitía que la metafísica no constituía un conocimiento científico, como ya había mostrado Kant, “que firmó su acta de defunción”⁷⁶⁷, porque –se supone⁷⁶⁸ que quiere decir Schrödinger, aunque no lo diga explícitamente–, que el carácter particular de las cosas del mundo no puede deducirse a partir de principios generales de la razón, sino que ha de obtenerse a través de la observación sensible de dichas cosas.

Es fácil derrumbar toda teoría metafísica alegando que no es científica, porque su objeto no es formal como el de las ciencias formales, ni su objeto es empírico como el de las ciencias empíricas. Pero, para Schrödinger, a pesar de que la metafísica no forme parte del edificio del conocimiento, constituye “el andamio de madera al que no se puede renunciar para continuar edificando”⁷⁶⁹. ¿Por qué es necesaria la metafísica? Porque ofrece las relaciones que se dan entre las diversas partes del todo, la estructura abstracta del mundo, la visión general necesaria para entender el mundo y

763 Esto es lo que manifiesta Schrödinger a pesar de que los trabajos sobre el color que realizó entre 1918 y 1920 --y que publicó hasta 1925, antes de dedicarse completamente a la mecánica de ondas-- estaban básicamente inspirados en el pensamiento de Mach. La visión humana del color constituye uno de los típicos ejemplos de las sensaciones machianas. Dichos trabajos, según Moore, constituyen una muestra muy significativa de la aplicación de los principios de Mach a un problema concreto. Son trabajos rigurosos que están constituidos por datos que son resultados directos de sensaciones humanas, pero estos trabajos no tuvieron consecuencias significativas, porque la visión del color está determinada por una forma general de percepción visual, que no contiene elementos en el sentido de Mach. W. Moore, *Ibid.*, (p. 127)

764 E. Schrödinger “La búsqueda del camino”, escrito en 1925 pero publicado en 1960 en *Mi concepción del mundo*. Tusquets Editores. Barcelona (1998) (p. 24). “La búsqueda del camino” es una explicación de la filosofía general de su autor. No es un libro de filosofía de la ciencia y parece no estar influido por sus investigaciones en física. Schrödinger decía que no se podían derivar consecuencias filosóficas de la física, pero, en cambio, mantenía que la filosofía sí influía en la física porque “ésta no podía sostenerse sobre sus propios pies y necesitaba una metafísica en la que apoyarse”. W. Moore, *Ibid.*, (p. 176)

765 Schrödinger usa el término “metafísica” con ambigüedad, porque le otorga diferentes significados, que pueden resumirse así: 1) Metafísica como conjunto de claves heurísticas que guían la investigación, por ejemplo, cuando escribe “no aconsejamos prescindir aquí de la guía metafísica”. 2) Metafísica como estructura general de una teoría; cuando compara la metafísica al andamio que permite la construcción del edificio del saber. 3) Metafísica como conjunto de propiedades generales de todas las cosas, cuando trata de la comprensibilidad como característica del mundo estudiado por la ciencia. Véase Scott, *Ibid.*, (p. 115)

766 Que obtuvo gran éxito porque llevó a purificar la ciencia de implicaciones injustificables; por ejemplo, ayudó a Einstein a darse cuenta de que el movimiento absoluto no es verificable y así crear su teoría de la relatividad especial y a Heisenberg en la formulación de la mecánica cuántica que nació, como hemos visto en el capítulo dedicado a este autor, para eliminar las implicaciones no observables de la teoría atómica de Bohr. M. Polanyi, *Ciencia, fe y sociedad*. Taurus ediciones. Madrid (1961)

767 E. Schrödinger, “La búsqueda del camino”, *Ibid.*, (p. 28)

768 Según Scott, *Ibid.*, (p. 116)

769 E. Schrödinger, “La búsqueda del camino”, *Ibid.*, (p. 21)

nuestra situación en el mundo⁷⁷⁰, la perspectiva global que nos permite colocar los seres que percibimos, el marco universal en el que caben todas nuestras percepciones y la clasificación de éstas, la perspectiva más amplia posible desde donde se pueda contemplar –es decir, ver y entender– toda nuestra vida, todo el devenir de la existencia, la realidad completa, el punto de vista que nos ayuda a orientar en el mundo. Por esta razón, todos tenemos una metafísica, incluso aquellos que lo niegan, como los materialistas, que mantienen que sólo existe el mundo material, al cual consideran el origen de todas nuestras vivencias, porque también “la hipótesis del mundo material es metafísica, ya que no corresponde en absoluto a nada observable”⁷⁷¹. Es imposible, para un ser humano, no disponer de unas creencias metafísicas, de la misma manera que es imposible dejar de pensar, porque tener una concepción metafísica es pensar en el mundo como un todo. Así, ante el asombro que los enigmas de la naturaleza provocan en el hombre y la perplejidad que éste siente, que no se refiere a un aspecto concreto del mundo sino a su totalidad, la ciencia no puede dar respuesta; sólo la metafísica puede hacerlo, pues va más allá de lo directamente perceptible y muestra relaciones generales que ni las ciencias formales ni las empíricas pueden encontrar⁷⁷². Cuando miramos el mundo vemos en él no sólo hechos concretos, particulares y perceptibles por los sentidos que son estudiados por las diferentes ciencias particulares sino también relaciones abstractas entre estos hechos, que dichas ciencias no estudian. Es más; la metafísica también ayuda a entender las diferentes ciencias particulares, porque, en su visión general, les proporciona unos fundamentos comunes en que apoyarse.

Schrödinger describe también la función de la metafísica con esta nueva imagen: “la metafísica constituye la punta del estandarte del ejército del conocimiento, los puestos más avanzados durante la penetración en un país enemigo desconocido; son imprescindibles aunque, como todo el mundo sabe, se encuentran expuestos a un gran peligro”⁷⁷³, ya que las proposiciones metafísicas son vulnerables porque son inverificables, porque no se basan en la observación sensible, porque se refieren a entidades no observables, generales, referidas al todo, al mundo y al yo. Por eso Mach advierte de los peligros de la metafísica. Pero lo hace, según Schrödinger, en exceso. Así, dice que Mach, al querer, con su positivismo, suplantar la metafísica por la física, “se está excediendo”⁷⁷⁴ porque “las esperanzas puestas en la *inteligibilidad de la naturaleza* van un poco más allá de la

770 Para Schrödinger, como veremos, la pregunta esencial a la cual intentamos responder a través de todas nuestras reflexiones, tanto científicas como filosóficas, es “¿Quiénes somos?”

771 E. Schrödinger, “La búsqueda del camino”, *Ibid.*, (p. 113)

772 E. Schrödinger, “La búsqueda del camino”, *Ibid.*, (p. 28)

773 E. Schrödinger, “La búsqueda del camino”, *Ibid.*, (p. 21)

774 E. Schrödinger, “La transformación del concepto físico del mundo” en *¿Qué es una ley de la Naturaleza?*, Fondo de cultura económica. México (1975) (p. 45)

completa, sencillísima y económica descripción de la naturaleza”⁷⁷⁵. Y Schrödinger cree que es posible unir la economía de pensamiento que predicaba Mach y ”la complementación de la experiencia”⁷⁷⁶ necesaria para tener una concepción ontológica global de toda la realidad. En cambio, Mach no creía en esta síntesis, porque desconfiaba de la capacidad especulativa del ser humano y pensaba que necesariamente le había de llevar a error.

Según Schrödinger, la actitud de Mach era excesivamente cauta, era demasiado temerosa e infundía en el científico una sensación de miedo e inseguridad que paralizaba el pensamiento, limitaba la imaginación e impedía que en él surgiera la inspiración y el impulso de creación. Miedo y creatividad son incompatibles, porque ésta necesita de la sensación de confianza, de seguridad, de libertad. Por esta razón Schrödinger manifestaba que “la angustia y el sentimiento de yermo y vacío[...] invade a todos los que por primera vez comprenden la perífrasis de *Kirchhoff-Mach* acerca del objeto de la física (y de la ciencia en general): una *descripción de los hechos lo más completa y con la mayor economía de pensamiento posibles*”⁷⁷⁷. Así pues, según Schrödinger, la supresión de la metafísica convertiría la ciencia en un pétreo esqueleto sin alma, incapaz del más mínimo progreso⁷⁷⁸.

10.LA CONCEPCIÓN METAFÍSICA DE SCHRÖDINGER

10.1 LA JUSTIFICACIÓN DEL MONISMO

Hay cuestiones inevitables que nos hacen ir más allá del mundo directamente observable para dirigirnos hacia consideraciones metafísicas, como ¿existe el yo, es decir, el alma⁷⁷⁹? ¿existe el mundo junto a mí? ¿deja de existir el yo con la muerte del cuerpo? Y sobretodo, la pregunta fundamental de Schrödinger, ¿quién soy yo? –en palabras de Plotino: “y nosotros, ¿qué somos en el fondo?”⁷⁸⁰–. Para responderlas Schrödinger usa el lenguaje y las nociones propias del monismo de

775E.Schrödinger, “La transformación del concepto físico del mundo” en *¿Qué es una ley de la Naturaleza?*”, *Ibid.*, (p.46)

776E.Schrödinger, “La transformación del concepto físico del mundo” en *¿Qué es una ley de la Naturaleza?*“, *Ibid.*, (p. 46)

777E. Schrödinger, “La búsqueda del camino”, *Ibid.*, (p.19).

778E. Schrödinger, “La búsqueda del camino”, *Ibid.*, (p. 20)

779 Schrödinger identifica el yo con el alma pero rechaza, calificándola de ingenua, la imagen del alma que tiene de forma transitoria su morada en el cuerpo y a la muerte de éste lo abandona para vivir otra existencia.E. Schrödinger, “La búsqueda del camino”, *Ibid.*, (p. 31)

780E. Schrödinger, *Ciencia y humanismo*, Tusquets editores. Barcelona (2009) (p. 14)

Mach:

Si se acepta el Yo es obvio que, debido a todos los hechos de la fisiología, está asegurado un encadenamiento de todas las sensaciones de este Yo con las modificaciones materiales del *propio cuerpo*, no pudiéndose dudar de la disolución de este Yo con la destrucción del cuerpo. Además no hay duda de que no es admisible la existencia de un mundo *junto* a mí, puesto que ambos se componen de los mismos “elementos” empíricos; eso que designamos con el nombre de mundo está *íntegramente* constituido por los mismos elementos de los que también está formado el Yo. En todo caso, lo que se llama mundo es sólo un complejo parcial del Yo; el propio cuerpo es únicamente un complejo parcial del complejo mundial⁷⁸¹.

¿Qué es el Yo para Schrödinger? Con este término él se refiere a la mente consciente⁷⁸², a la colección de datos individuales, tanto a las experiencias actuales como a los recuerdos de experiencias ya pasadas. Es como el lienzo⁷⁸³ sobre el cual se han recogido todas nuestras vivencias. Todos tenemos la impresión de que nuestras experiencias, presentes y pasadas, forman una unidad muy diferente de la de cualquier otra persona.

Para ilustrar su concepción metafísica, Schrödinger ofrece como ejemplo una típica percepción del mundo que encontramos en nuestro yo: la percepción de un árbol. ¿Qué es lo que percibimos cuando vemos un árbol? Se puede responder que nuestra percepción constituye un acercamiento al “árbol en sí”, que pertenecería a la esfera de la “cosa en sí” de Kant. Sin embargo, yo veo mi árbol, la otra persona ve el suyo –que Schrödinger confía que es “extraordinariamente parecido al mío”⁷⁸⁴–, pero ambos desconocemos qué es el árbol en sí. Así pues, esta “cosa en sí” por definición es incognoscible, “imperceptible para nosotros”⁷⁸⁵; por tanto, como hemos visto que mantenía Mach, por el principio de economía, Schrödinger concluye que esta noción “carece de todo interés para nosotros”⁷⁸⁶ y podemos renunciar a ella. Por consiguiente, hemos de borrar de nuestra mente la idea de “árbol en sí”.

Por otra parte, estamos seguros de percibir un árbol pero no podemos explicar por qué y cómo se percibe; es decir, no podemos saber cómo a partir del árbol físico se ha formado el árbol psíquico de

781E. Schrödinger, “La búsqueda del camino”, *Ibid.*, (p. 30)

782E. Schrödinger, *Què és la vida? La ment i la matèria*, *Ibid.*, (p 124)

783E. Schrödinger, *Què és la vida? La ment i la matèria*, *Ibid.*, (p127)

784E. Schrödinger, *Què és la vida? La ment i la matèria*, *Ibid.*, (p.126)

785E. Schrödinger, “La búsqueda del camino”, *Ibid.*, (p. 32)

786 E.Schrödinger, “La búsqueda del camino”, *Ibid.*, (p.32)

nuestra mente. “No vemos de ninguna manera cómo puede traducirse el suceso material en sensación o pensamiento”⁷⁸⁷. Nos planteamos cuestiones como las siguientes: ¿cómo actúa la materia sobre la mente para producir en ella las cualidades sensoriales?⁷⁸⁸, ¿cómo actúa la mente sobre la materia para moverla según su voluntad? Pero no tenemos respuesta para estas preguntas, es decir, no podemos saber exactamente cómo se produce la interrelación físico-psíquica, la interacción recíproca que se da entre “los sucesos en dos ámbitos completamente distintos”⁷⁸⁹, tanto en un sentido como en el otro:

ya que el *uno* (la determinación causal de la materia por parte de la mente –*mind*–) debe necesariamente perturbar las propias leyes del acontecer material mientras que el *otro* (la influencia causal de la mente por parte del cuerpo...) se cierra por completo a nuestra comprensión

Para evitar el problema de la interacción, Schrödinger renuncia al tradicional dualismo cuerpo-alma. Se siente justificado para ello aplicando el principio de economía de Mach, la navaja de Occam. No puede entender cómo se relacionan los dos ámbitos, no necesita de ambos, uno de ellos es superfluo; si sólo hay un ámbito no existe ningún problema de interacción; por esta razón, renuncia a uno de ellos y acepta el monismo. Esta solución hace mucho tiempo que la había adoptado el materialismo, para el cual sólo existen los cuerpos materiales. Pero Schrödinger mantiene que “si se decide tener sólo *un* ámbito, entonces éste tiene que ser el psíquico, dado que lo psíquico (*cogit est*) está de todos modos”⁷⁹⁰. Schrödinger, de nuevo, justifica su conclusión con la navaja de Occam. Si sólo existe una realidad y es indudable que tengo percepciones, entonces esta única realidad son las percepciones. Volviendo al ejemplo de mi percepción del árbol, veo claramente que el árbol que percibo es el único árbol que es percibido por mí, pues no hay otro árbol que no sea percibido. Así pues, por el principio de economía, puedo renunciar al árbol físico, ya que no puedo renunciar al árbol psíquico, que es el único del que estoy seguro. En consecuencia, no existe ningún árbol del cual surja la imagen del árbol que yo tengo; si creemos que existe este árbol material que me provoca la imagen psíquica es sólo debido a la influencia de la metafísica que hemos heredado

787 E. Schrödinger, “¿Qué es real?”, escrito en 1960 y publicado como segunda parte de *Mi concepción del mundo* *Ibid.*, (p. 80)

788 Así pues, el físico no puede explicar la sensación de color con sus conocimientos de las ondas de luz; ¿podría hacerlo el fisiólogo, con sus conocimientos de los procesos en la retina y los procesos nerviosos provocados por ellos en el paquete de nervios ópticos y en el cerebro?. Yo no lo creo”, declaró Schrödinger en su primera conferencia James.E. Schrödinger, *The Interpretation of Quantum Mechanics* *Ibid.*, (p.126,145)

789 E. Schrödinger, “¿Qué es real?”, *Ibid.*, (p.79)

790 E. Schrödinger, “¿Qué es real?”, *Ibid.*, (p. 81)

de nuestra tradición. “Nadie percibe dos mundos, uno observado y otro 'real'”⁷⁹¹

En conclusión, el árbol es tan sólo la percepción del árbol. Como mantenía Mach, son los mismos elementos los que componen el yo y los que componen el llamado mundo exterior. Cuando los consideramos elementos del yo los llamamos sensaciones y cuando los consideramos elementos del mundo exterior los llamamos cosas o cuerpos. Así, “mundo exterior y conciencia son una y la misma cosa en tanto una y la otra están compuestos por los mismos elementos primitivos”⁷⁹² pero como la conciencia es aquello gracias a lo cual este mundo se manifiesta en primer lugar, “podemos afirmar tranquilamente que el mundo está formado por elementos de conciencia”⁷⁹³.

Pero, si la conciencia nunca se experimenta en plural, sino únicamente en singular, ¿cómo nace en nosotros la idea de la pluralidad de conciencias? Schrödinger responde así⁷⁹⁴: la conciencia se encuentra íntimamente conectada al estado físico de una región limitada de la materia, es decir, a su cuerpo; y, además, la conciencia percibe una gran cantidad de cuerpos similares; a partir de ello suponemos la existencia de una pluralidad de conciencias, de mentes, de almas, de yoes.

10.2 PRECEDENTES DEL MONISMO DE SCHRÖDINGER

Schrödinger se sentía cercano a Spinoza⁷⁹⁵, que también había adoptado el monismo y así había evitado el problema de la interacción mente-cuerpo. El monismo de este filósofo racionalista es panteísta, porque Spinoza unificó los dos atributos en una sola sustancia, Dios o la Naturaleza, dotada de dos atributos que nosotros conocemos, la extensión y el espíritu. Spinoza identificaba la sustancia con Dios cuando se refería al atributo mental y la identificaba con la Naturaleza cuando se refería al atributo material. Así, para Spinoza, el cuerpo humano era “una modificación de la infinita sustancia (Dios o la Naturaleza), en tanto que expresada por el atributo de la extensión” y “el espíritu humano es *la misma* modificación pero expresada por el atributo de la razón”⁷⁹⁶. Pero Schrödinger plantea una cuestión a Spinoza: si yo soy una parte, un trozo, un aspecto, una modificación del ser eterno e infinito que es Dios, ¿qué parte soy precisamente yo? ¿qué me

791E.Schrödinger, “¿Qué es real?”, *Ibid.*, (p. 87)

792E.Schrödinger, “La búsqueda del camino”, *Ibid.*, (p. 54)

793E.Schrödinger, “La búsqueda del camino”, *Ibid.*, (p. 57)

794E.Schrödinger, *¿Qué es la vida? La ment i la matèria*, *Ibid.*, (p.125)

795E. Schrödinger, “¿Qué es real?”, *Ibid.*, (p. 80)

796E. Schrödinger, “La búsqueda del camino”, *Ibid.*, (p.58)

diferencia de los demás?⁷⁹⁷. (Podríamos decir que el monismo de Schrödinger es más radical porque él mantiene que yo soy “todo en todo”⁷⁹⁸ y mi vida no es un fragmento del acontecer mundial sino, en cierto sentido, es la totalidad)⁷⁹⁹

Schrödinger consideraba su monismo cercano al monismo neutral de Bertrand Russell⁸⁰⁰; manifestaba Schrödinger que Russell, en *El análisis de la mente*, publicado en 1921, mantenía que los estados del alma y el cuerpo estaban formados por elementos de la misma clase, “sólo que ligados de forma diferente”⁸⁰¹. Schrödinger reconocía su deuda con Russell a través de estas palabras:

Nuestro ego pensante y el llamado mundo externo consiste en los mismos elementos, sólo comprendidos de diferentes maneras. Los elementos en sí mismos (estoy siguiendo a Bertrand Russell) no pueden llamarse psíquicos o físicos, mentales o materiales, únicamente después de ser dispuestos de varias formas en el lenguaje convencional adquieren esta o aquella característica. En cualquier caso, el llamado mundo externo está construido exclusivamente por constituyentes del ego⁸⁰²

Efectivamente, la concepción monista que mantuvo Schrödinger a lo largo de toda su vida es cercana a la que mantuvo Russell en aquella obra, que había dedicado a desarrollar la idea de que los estados psíquicos y los cuerpos físicos están compuestos de los mismos elementos, pero relacionados de diferentes maneras. Así, la substancia (*stuff*) de la cual se compone el mundo que percibimos “no es ni mente ni materia, sino algo más primitivo que ámbas. Mente y materia parecen ser compuestas y la substancia de la que se componen se encuentra en un sentido entre las dos, en

797E. Schrödinger, “La búsqueda del camino”, *Ibid.*, (p. 38)

798E. Schrödinger, “La búsqueda del camino”, *Ibid.*, (p. 38)

799 Como veremos, el monismo de Schrödinger se acerca, como el mismo dice, al de la filosofía vedanta. Así, escribe: “es esto lo que los brahmanes expresan ...con palabras como: yo estoy en el este y en el oeste, estoy abajo y arriba, *yo soy la totalidad del mundo*” E. Schrödinger, “La búsqueda del camino”, *Ibid.*, (p.38)

800E. Schrödinger, “La búsqueda del camino”, *Ibid.*, (p.80) y “¿Puede quizás la energía ser un concepto simplemente estadístico?” *Il nuovo cimento*. Vol IX, N1(1958) (p 168).

801 Escribe: “Bertrand Russell formuló en su *El análisis de la mente* un principio prometedor, haciendo que los estados del alma y el cuerpo estuviesen formados por elementos del mismo tipo”. E. Schrödinger, “La búsqueda del camino” *Ibid.*, (p.81)

802E. Schrödinger en “¿Puede quizás la energía ser un concepto simplemente estadístico?” *Ibid.*, (p.168) , publicado en 1958, vemos que Schrödinger defendió el monismo a lo largo de toda su vida. En este artículo utiliza la ontología monista para rechazar la conclusión de la “visión” de Copenhague según la cual la descripción de la realidad objetiva es imposible porque nuestro conocimiento de las cosas está basado en nuestra interacción con ellas, interacción que es incontrolable. Schrödinger argumenta que la visión de Copenhague está basada en la separación del ego y del mundo exterior, concepción metafísica que él no acepta y, ante ella, propone la concepción monista de B. Russell

un sentido sobre las dos, como un ancestro común”⁸⁰³, algo más primitivo.⁸⁰⁴

Pero es el monismo védico el más cercano al monismo de Schrödinger⁸⁰⁵. La filosofía vedanta⁸⁰⁶ subraya la unidad de todo lo que existe; así según este pensamiento, tras el flujo del mundo, tal como se percibe, hay una realidad única e imperecedera, denominada *Brahman* o *atnam*, entidad abstracta, espiritual e impersonal, cuya esencia es la conciencia. El *Brahman* constituye el Principio Supremo, lo Absoluto –noción que lo aproxima al concepto tradicional occidental de Dios– pero no es la materia de que está hecho el mundo que percibimos a través de los sentidos, más bien es una realidad oculta que permite que todas las cosas existan. Por otra parte, el *atman* constituye el alma consciente, el yo. Mas *Brahman* es la única entidad consciente que existe en la realidad. Por consiguiente, *Brahman* y *atman* se identifican. Recordemos que Schrödinger justificaba su monismo con el argumento siguiente: ya que no se puede explicar la interacción entre el mundo físico y el psíquico, por el principio de economía, sólo es necesario aceptar un mundo y el mundo que indudablemente sabemos que existe es el psíquico. Schrödinger completaba el anterior argumento con la constatación de que todos los cuerpos están constituídos por los mismos componentes, “un número relativamente pequeño de unidades básicas”⁸⁰⁷. Así Schrödinger reiteraba que había llegado a la misma conclusión que la filosofía vedanta: la multiplicidad percibida por los sentidos es sólo apariencia; en el fondo, todo es la misma sustancia, una única realidad⁸⁰⁸. Incluso Schrödinger comparaba dicha totalidad con Dios, puesto que escribió que es “algo así como un Dios” según la terminología occidental y como *Brahman* en las *Upanishads*⁸⁰⁹. Encontramos también en Schrödinger otras alegorías⁸¹⁰ para expresar sus creencias monistas. La multiplicidad del mundo es como el conjunto de las múltiples imágenes “de un objeto que una piedra preciosa refleja en sus muchas caras talladas”⁸¹¹, así un cristal multifacético “muestra centenares de pequeñas imágenes de

803B. Russell. *The Analysis of Mind*. George Allen & Unwin Ltd. (1921) London (p 10)

804No obstante, Russell posteriormente rechazó esta concepción y volvió a aceptar la concepción de un mundo real externo. B. Russell, *El coneixement humà. II* Edicions 62. Barcelona (1985) (p 277)

805. Schrödinger, “La búsqueda del camino”, *Ibid.*, (p. 114)

806La filosofía vedanta es la interpretación más influyente de las *Upanishads*, la parte más sistemáticamente filosófica de los Vedas, que constituyen la Biblia de la tradición religiosa de la India.

807E. Schrödinger, “La búsqueda del camino”, *Ibid.* (p.59)

808También Schrödinger se sentía atraído hacia la filosofía védica por las consecuencias éticas del monismo de ésta. Así, si sentimos que todos los seres somos uno, no dañaremos ningún otro ser y, al cuidar de las otras criaturas, cuidaremos de nosotros mismos; además la muerte no será nada para nosotros, porque continuamos en las generaciones futuras de la misma manera que somos los herederos de las generaciones pasadas. Según Schrödinger, la ética vedanta ensalza “como el máximo bien alcanzable, el cuidado y la bondad para con todo ser viviente”. “¿Qué es real?”, *Ibid.* (p.116)

809E. Schrödinger, “¿Qué es real?”, *Ibid.* (p.114)

810La pluralidad que percibimos es como la multitud de imágenes que produce una galería de espejos o como el Guarisankar y el Everest, que constituyen la misma montaña contemplada desde dos valles distintos. E. Schrödinger, *Què és la vida? La ment i la matèria*, *Ibid.* (p.126)

811E. Schrödinger, “¿Qué es real?”, *Ibid.* (p.115)

un objeto que, en realidad, existe sólo *una* vez, sin que ciertamente el objeto se multiplique en realidad”⁸¹²

Llegó Schrödinger a calificar su metafísica de mística; pero, añadía, en el mismo sentido que es mística la metafísica realista que se acepta habitualmente, la ontología según la cual existe el mundo material exterior al yo, puesto que es una concepción que no se puede demostrar rigurosamente. Según Schrödinger, no se puede demostrar rigurosamente –como desearían científicos y filósofos occidentales– ninguna concepción metafísica, ninguna imagen general del mundo, ningún marco conceptual referido a toda la realidad, porque la deducción lógica (“el razonar”) no puede salir del sistema construido sobre unos principios determinados que se han adoptado, está “atrapada completamente en él”⁸¹³. Pero no por esta insuficiencia del razonamiento lógico deductivo hay que renunciar a disponer de un modelo del mundo, de un marco de referencia general, puesto que lo necesitamos para situarnos a nosotros mismos y a todas las cosas que percibimos. Por consiguiente, hemos de completar los conocimientos que nos ofrece la ciencia con una metafísica⁸¹⁴

10.3 SCHOPENHAUER Y KANT

Schrödinger citaba frecuentemente, con admiración, a Schopenhauer, de quien mantuvo influencia directa a lo largo de toda su vida y a través del cual conoció el monismo védico, la filosofía de las *Upanishads*⁸¹⁵. Veamos, a grandes trazos, el pensamiento de este filósofo. Schopenhauer pensaba, apoyándose explícitamente en Kant, que el mundo tal como nos es dado es sólo una representación:

El mundo es mi representación: esta verdad es aplicable a todo ser que vive y conoce, aunque sólo al hombre le sea dado tener conciencia de ella [...] Cuando el hombre conoce esta verdad estará para él claramente demostrado que no conoce un sol ni una tierra y sí únicamente un ojo que ve el sol y una mano que siente el contacto de la tierra; que el mundo que le rodea no existe más que como representación, esto es, en relación con otro ser: aquel que le percibe, o sea, él mismo⁸¹⁶

812E. Schrodinger, “La búsqueda del camino”, *Ibid.* (p. 36)

813E. Schrödinger, “La búsqueda del camino”, *Ibid.* (p.36)

814Como se ha puesto de manifiesto en el anterior apartado “Actitud de Schrödinger ante la metafísica”

815E. Schrödinger, “Mi vida” en *Mi concepción del mundo*, *Ibid.*, (p137) ensayo en el que exponía su metafísica de manera informal. Este estilo de exposición es consistente con su tesis de que no es posible presentar una rigurosa demostración de las proposiciones metafísicas. W. Moore, *Ibid.*, (p. 476)

816A. Schopenhauer, *El mundo como voluntad y representación* m, Edit Porrúa. México (1992) (p. 19)

Schopenhauer⁸¹⁷ seguía a Kant al considerar que la mente no recibe de forma pasiva las impresiones de los sentidos sino que toma un papel activo al adaptar los fenómenos a las condiciones de espacio, tiempo y causalidad. Todas nuestras experiencias están sometidas a estas tres formas de representación. No nos es posible percibir ningún hecho sensible fuera de ellas.

El fenómeno es representación, apariencia de multiplicidad, pero ¿qué hay tras él? Kant respondía que se encuentra el *noumeno*, el *Ding an sich*, la cosa en sí, que siempre permanece inaccesible. Schopenhauer, en cambio, respondía que la cosa en sí es la voluntad. La voluntad no es un fenómeno, una representación, es la realidad, tanto para el hombre como para la Naturaleza. Así, Schopenhauer no sólo pensaba que el hombre siente dentro de sí la voluntad y el deseo, con tal intensidad que los consideraba su esencia sino que también creía que

el impulso poderoso e incontenible con el cual se precipitan las corrientes de agua en los abismos,[...], el afán con que el hierro sigue siempre al imán y la viveza con que los polos de la electricidad tratan de reunirse y que, lo mismo que los deseos humanos, se acrecienta con los obstáculos [...] por ser una y la misma cosa en todas partes [...] también aquí debe llevar el nombre de voluntad, el cual designa lo que constituye el ser en sí de todas las cosas del universo⁸¹⁸

Sobre esta intuición, sobre el principio según el cual la voluntad es la esencia de todas las cosas, Schopenhauer construyó su filosofía. Y al mirar la voluntad del hombre la contempló desde una perspectiva completamente pesimista. Consideró que la voluntad lleva consigo, inevitablemente, el dolor y llegó a la triste⁸¹⁹ conclusión de que “la vida no es otra cosa que dolor”⁸²⁰.

La única vía para que el ser humano deje de padecer es la aniquilación del deseo, la supresión de la voluntad de vivir. Sólo así es posible no sufrir agitación y tormento. Sólo así es posible disfrutar de paz profunda. Aunque en Occidente ha habido intentos de negar las pasiones y los deseos para alcanzar la beatitud –como es el caso de Spinoza– es en la India donde la negación de la voluntad

817Se consideraba a sí mismo el único sucesor auténtico de Kant, según E.Friedrich Sauer. Introducción de la edición anterior.

818A. Schopenhauer, *Ibid.*, (p.103)

819Según Moore, el estilo de este filósofo del pesimismo se adaptaba perfectamente a la situación de la sociedad centroeuropea de la época, inmediatamente después de terminar la I Guerra Mundial y podía tener un efecto consolador. *Ibid.*, (p. 111). Por otra parte, para el mismo Schrödinger, Schopenhauer representaba el pesimismo filosófico, como manifiesta en “La búsqueda del camino” *Ibid.*, (p. 28)

820A.Schopenhauer, *Ibid.* (p.304)

de vivir ha tenido un mayor desarrollo⁸²¹, especialmente en la filosofía de los Vedas⁸²²

11. LA IMAGEN DEL MUNDO QUE OFRECE LA CIENCIA NATURAL

11.1 EL ORIGEN DE LA CIENCIA NATURAL

Como acabamos de ver, Schrödinger se alejó de la investigación física propiamente dicha, para responder a eternas cuestiones filosóficas como ¿quiénes somos? y ¿qué papel representamos en el mundo? Sus respuestas fueron completamente especulativas y las desarrolló de forma no sistemática, en ensayos y conferencias, escritos desde 1925 a 1960, que reflejan sus inquietudes como filósofo en el sentido más tradicional del término, en el sentido etimológico de “amante del saber” en general. Este trabajo filosófico de Schrödinger, que mantiene constantes, a lo largo de su vida, sus tesis principales, responde al estado psicológico que él consideraba propio del filósofo, al “asombro filosófico”, la perplejidad, la maravilla, ante el todo –al hecho de contemplar con admiración y extrañeza la totalidad de la existencia–, no ante unos determinados aspectos concretos del todo, como responden las ciencias particulares⁸²³.

Así, ante la pregunta ¿cuál es el valor de las ciencias? Schrödinger respondía que las ciencias especializadas no tenían valor por separado. “Ninguna de ellas por sí sola tiene ningún alcance o valor si no van unidas. Y este valor tiene una definición muy simple: obedecer el mandato de la deidad délfica: $\nu\theta\eta\ \sigma\epsilon\alpha\upsilon\tau\acute{o}\nu$, concómete a ti mismo”⁸²⁴. Proseguía Schrödinger:

Nazco en un medio y no sé de dónde vengo, adónde voy ni quien soy. Esto le pasa a todo el mundo. El hecho de que todos hayan estado siempre en esta situación y vayan siempre a estarlo, de nada me sirve. La cuestión candente es dónde y adónde; lo único que podemos observar es nuestro entorno presente.

821A. Schopenhauer, *El mundo como voluntad y representación*, *Ibid.*, (p. 297)

822Por esta razón, a lo largo de su obra “El mundo como *voluntad* y representación” Schopenhauer utiliza a menudo la imagen del “velo de Maya” para referirse al mundo exterior como empíricamente percibido, como representación, como apariencia de multiplicidades (p. 201, 224, 287, 288,292); es el mundo del espacio, el tiempo y la causación. El velo de Maya cubre la auténtica realidad. Para descubrirla y conocerla hay que apartarlo. En la filosofía vedanta “Maya” designaba la ignorancia inherente a la naturaleza humana y tomaba el sentido de ilusión, decepción y fraude y adquirió la forma de una personalidad mitológica, según M.Müller (1823-1900) en *Introducción a la filosofía vedanta*. Editorial mra . Barcelona (1997).

823. Schrödinger atribuía a Epicuro la constatación de que toda la filosofía tiene su origen en el $\theta\alpha\upsilon\mu\acute{\alpha}\zeta\epsilon\iota\nu$, el asombro filosófico ante la situación en que los seres humanos nos encontramos ante el mundo sin saber el porqué. E. Schrödinger “La búsqueda del camino”, *Ibid.* (p. 27)

824E. Schrödinger, *Ciencia y Humanismo*. Tusquets editores.Barcelona (2009), (p. 14)

Por ello nos esforzamos en averiguar lo más posible. Eso es la ciencia, aprendizaje, saber; ésta es la verdadera fuente de todo el esfuerzo espiritual del hombre [...]

Parece claro y evidente, pero hay que decirlo: el saber aislado, conseguido por un grupo de especialistas en un campo limitado, no tiene ningún valor, únicamente su síntesis con el resto del saber, y esto en tanto que esta síntesis contribuya realmente a responder el interrogante τίνας δέ ἡμεῖς (“¿qué somos?”)⁸²⁵

Vemos que Schrödinger quiere, ante todo, saber qué es, de dónde viene y adónde va. Para ello observa el mundo, hace ciencia. Por tanto, lo que le interesa de la ciencia es la imagen que ésta nos ofrece del mundo⁸²⁶. Según Schrödinger⁸²⁷ la visión del cosmos que presenta la ciencia “es una orientación espiritual descubierta por los pensadores griegos y que ellos nos han legado”⁸²⁸. La ciencia constituye una manera de pensar que en la Antigüedad sólo se dió en Grecia y que nosotros hemos heredado. Sustituyó la tradicional explicación mítica de los grandes cambios de la Naturaleza por la “suposición de que el mundo es un mecanismo comprensible, en el cual puede profundizarse por medio de la observación y la especulación, hasta que es posible preverlo”⁸²⁹, lo cual comporta más ventajas prácticas que la explicación por etiología religiosa. Los rasgos característicos de esta mentalidad, que la diferencian de otras formas de pensar existentes en la historia –como la magia, la superstición y el espiritismo– y que constituyen el fundamento de toda investigación científica, según Schrödinger, son los dos siguientes:

825E. Schrödinger, *Ciencia y Humanismo, Ibid.*, (p. 15)

826No obstante, a pesar de la insistencia de Schrödinger en la integración de todo el conocimiento, sus escritos muestran pocos puntos formales de contacto entre su trabajo como científico y sus reflexiones como filósofo, como constata W. Scott en *Ibid.*, (p. 106). Así, aunque en los trabajos más filosóficos hay algunas alusiones a sus investigaciones físicas, la principal relación se encuentra en la persona misma de Schrödinger, que escribió ensayos filosóficos como un físico teórico a quien le inquietaban las preguntas más fundamentales. Así, en el prefacio de *Mi concepción del mundo* declaraba: “Habrá, sin embargo, un reproche que no podré evitar...¿Por qué no habla de lo que entiende, en vez de meterse en el campo de los filósofos profesionales? *Ne sutor supra crepidam* “(Zapatero a tus zapatos).

Con gusto respondo: porque me parece que estas cosas tienen menos que ver con la imagen filosófica del mundo que lo que se desea en la actualidad”. Parece que Schrödinger al final alude a la interpretación de Copenhague.

827Que en este tema sigue a dos estudiosos de la antigüedad griega, J. Burnet y T. Gomperz. Del primero extrae la siguiente cita, que es muy significativa: “Una adecuada descripción de la ciencia consiste en decir que es pensar acerca del mundo a la manera de los griegos. Pues la ciencia nunca ha existido más que entre los pueblos que han recibido la influencia de Grecia”. Del segundo: “Casi toda nuestra cultura es de origen griego. El conocimiento absoluto de estos orígenes es requisito imprescindible para *liberarnos* de su excesivo influjo. Pasar por alto nuestro pasado es, en este caso, no sólo indeseable, sino imposible” E. Schrödinger, “La singularidad de la imagen del mundo de la ciencia natural” en *¿Qué es una ley de la Naturaleza?*, Fondo de Cultura Económica. México (1975) (p. 39)

828E. Schrödinger, “La singularidad de la imagen del mundo de la ciencia natural”, *Ibid.*, (p.44)

829E. Schrödinger, “La singularidad de la imagen del mundo de la ciencia natural”, *Ibid.*, (p. 49)

El principio de inteligibilidad, según el cual se puede comprender y explicar el devenir de la Naturaleza.

Y el principio de objetivación, según el cual se omite el sujeto cognoscente dentro del cuadro que explica el flujo de la Naturaleza y se lo limita al papel de quien lo observa desde el exterior⁸³⁰

Aunque para analizar estos dos supuestos se los haya de separar, en realidad están indisolublemente unidos y forman un todo. Según Schrödinger, se adquiere el primero, la inteligibilidad, al precio del segundo, la objetividad.

Schrödinger fue posiblemente estimulado a reflexionar sobre los supuestos propios del pensamiento científico por sus diferencias con la ampliamente aceptada interpretación que de la mecánica cuántica presentaba la escuela de Copenhague, según la cual la materia a escala atómica es esencialmente incomprensible. Así, Schrödinger escribió:

Un dogma ampliamente aceptado afirma que no puede haber un cuadro objetivo de la realidad en ninguno de los sentidos en que antes se creía. Tan sólo los optimistas que hay entre nosotros (entre los cuales me cuento yo mismo) consideran esto como una extravagancia filosófica, como una medida desesperada tomada ante una gran crisis. Esperamos que lo vacilante de los conceptos y las opiniones sólo revele un violento proceso de transformación, que finalmente nos conducirá a algo mejor que el estéril formulismo que ha paralizado nuestra situación actual⁸³¹

La justificación de la imposibilidad de conseguir un cuadro objetivo de la realidad se basaba, según la interpretación de Copenhague, en la inevitable perturbación que el dispositivo de medida ejerce sobre el objeto cuántico. Por esta razón, las IFMS que veremos, que constituyen medidas sin interacción, llevan a la necesidad de revisar el dogma al que alude Schrödinger.

11.2 EL PRINCIPIO DE INTELIGIBILIDAD

Este principio es tan trivial que lo utilizamos continuamente en nuestra vida diaria sin darnos cuenta

830E. Schrödinger, “La singularidad de la imagen del mundo de la ciencia natural”, *Ibid.*, (p.45)

831E. Schrödinger, “Nuestro concepto de la materia”, publicado en *¿Qué es una ley de la Naturaleza?* *Ibid* (p 139)

de él, porque toda nuestra mentalidad está basada en la suposición de que podemos entender la realidad. Pero este principio tiene un origen que se remonta a los físicos jonios del s VI a.C., quienes dieron el trascendental paso del mito al logos, al sustituir la etiología religiosa de los fenómenos naturales por la suposición de que la Naturaleza es un mecanismo cuyo funcionamiento se puede comprender y prever. Pero para entender la Naturaleza no es suficiente observar y describir los hechos. El positivismo de Mach había sido provechoso para frenar las explicaciones puramente verbales y especulativas que obstaculizaban la investigación de los hechos pero se había “excedido”. Según Schrödinger se había de tener en cuenta que Mach, siguiendo su principio de rechazar todas las construcciones que fueran inverificables, había llegado a un “error fundamental”⁸³², el rechazo radical de los conceptos atomistas y moleculares. Había que recordarlo a los neomachianos que, posteriormente, intentaron de nuevo aplicar dicho principio a la mecánica cuántica.

El mismo Mach admitía que la ciencia había “de completar hechos, que –parcialmente– se encuentran a mano, con el pensamiento”⁸³³. Mas esto, según Schrödinger, sólo se puede hacer a través de construcciones mentales auxiliares que den cohesión a los hechos observables; pero éstas no son observables y, por esta razón, Mach las rechazaba. En cambio, para Schrödinger, dichas construcciones mentales constituían el fruto más preciado del trabajo del científico porque ofrecían un cuadro general del tema estudiado que, gracias a ellas, era “cada vez más claro, observable y comprensible en su armonía”⁸³⁴. Pero esta armonía, esta cohesión interna, sería destruida si, “por un escrupuloso apego a la verdad” excluyéramos de ella todos los contenidos que no fueran observables, porque entonces faltarían elementos al sistema, faltarían los elementos que no podemos percibir directamente pero necesitamos para entender los hechos observables⁸³⁵.

Y este” edificio conceptual”⁸³⁶ se levanta constantemente con ayuda de la inducción, que permite generalizar observaciones. La ley de la inducción se ha impuesto porque tiene un valor adaptativo, en sentido darwiniano. Así, la teoría de la adaptación muestra que es favorable para el ser vivo volver a reaccionar con un mismo acto ante una situación ambiental reiterada de la cual este ser, realizando dicho acto, había salido con éxito en el pasado. Esta propiedad, este hábito de reacción,

832E.Schrödinger, “La singularidad de la imagen del mundo de la ciencia natural”, publicado en *¿Qué es una ley de la Naturaleza?*” *Ibid.*, (p. 63)

833 E. Schrödinger, “La singularidad de la imagen del mundo de la ciencia natural”, *Ibid.*, (p. 59).

834E.Schrödinger, “La singularidad de la imagen del mundo de la ciencia natural”, *Ibid.*, (p. 66)

835En nuestra opinión, este enunciado de Schrödinger podría llevar a justificar nociones explicativas muy alejadas de los hechos observables.

836E. Schrödinger, “La singularidad de la imagen del mundo de la ciencia natural “, *Ibid.*, (p. 69)

que se encuentra en todos los seres vivos, en el hombre se hace consciente y se convierte en inducción de los hechos que él ha observado.

Pero para construir el cuadro conceptual que busca el ser humano en general (y el científico en particular), para entender los hechos que éste percibe, la inducción no es suficiente, puesto que hay que relacionar estos hechos para así formar una imagen cohesionada. Se necesita completarlos con contenidos mentales que no son directamente observables. Nuestra mente ya realiza habitualmente esta acción de completar los hechos percibidos; así si tomamos un ejemplo cotidiano, como un cesto de fruta, y nos preguntamos por qué le atribuimos existencia real –como a los otros objetos de nuestro entorno– vemos que sólo tenemos algunas percepciones sensibles de él, por ejemplo, las de la vista y el tacto. Pero todo el cesto de fruta, como un todo, “no es realmente nada más que un *marco* que sirve para unir ciertas percepciones de los sentidos, algunas de las cuales son actuales mientras la mayoría son virtuales”⁸³⁷. Anticipamos que las percepciones que imaginamos seguirán a las que vemos. Suponemos también que no cambiará nuestra imagen visual mientras no cambie nuestro punto de vista y esperamos sentir ciertas sensaciones de gusto si mordemos una fruta y cierto crujido si apretamos el cesto (si está hecho de mimbre), aunque habitualmente no seamos conscientes de estas expectativas. De esta manera, según Schrödinger, nos formamos el concepto de la realidad que nos rodea⁸³⁸: “algunas percepciones y sensaciones actuales son automáticamente suplementadas por un conjunto de percepciones virtuales y aparecen conectadas en complejos independientes que llamamos *objetos* existentes”⁸³⁹ E inconscientemente suponemos que estas percepciones virtuales son posibles.

Lo mismo ocurre con los objetos de la ciencia que constituyen los elementos de los cuadros conceptuales que, sin ser directamente observables, cohesionan los elementos observables para que los podamos entender. Son objetos realmente existentes en el sentido anterior, porque la ciencia, según Schrödinger, no se aparta esencialmente de la manera habitual de pensar en nuestra vida diaria.

Pero los objetos que investiga la física son a veces tan sorprendentes que nos hacen sentir como el

837E. Schrödinger, “Conceptual Models in Physics and their Philosophical Value” en *Science and the Human Temperament*. George Allen & Unwin Ltd. London (1935), disponible también *on line*. (p. 119)

838Esta noción de realidad se encuentra en la línea del empirismo británico; estos argumentos de Schrödinger recuerdan los de Locke y especialmente los de Hume.

839E. Schrödinger, “Conceptual Models in Physics and their Philosophical Value” *Ibid.*, (p. 120)

sonámbulo que, de repente, se despierta y, ante lo que nosotros le decimos que le hemos visto hacer, exclama “Cielos! ¿Está todo eso realmente probado y es cierto?”⁸⁴⁰ Por ejemplo, ¿está comprobado que los electrones existen de la misma manera que los objetos que están a nuestro alrededor y que podemos tocar? ¿Se comportan realmente como dicen los físicos?

Así pues, para la ciencia física, una cuestión epistemológica fundamental es si también podemos concebir observaciones virtuales en las cuales se pueda basar la “existencia real” de los objetos de la física, como en el caso de los objetos cotidianos. Esta cuestión surge de una preocupación que, según Schrödinger, está completamente justificada, porque hay estructuras del edificio conceptual de la física (como es el caso de la física atómica) que son tan “sutiles”⁸⁴¹ que están muy lejos de poder ser directamente observables, perceptibles por los sentidos, por ejemplo, ¿pueden realizarse o se puede imaginar que se puedan realizar observaciones de las órbitas de los electrones, de manera que sean visibles?

En primer lugar, hay que tener en cuenta que hay un límite a la visibilidad, porque sólo pueden percibirse las estructuras cuyo tamaño (*minuteness*) no sea menor que la longitud de onda de la luz utilizada en el microscopio. Pero no es necesario que sea visual la observación virtual en que se base nuestra convicción de que las órbitas de los electrones realmente existen. Podría ser que, considerando los electrones centros de campo, se pudiera realizar un registro exacto del campo que rodea el átomo que permitiera inferir las revoluciones de los electrones como lo describe la teoría de Bohr. Pero esto es también imposible; porque el “*campo* es también totalmente diferente de lo que podía esperarse”⁸⁴²

Ante esta situación, concluye Schrödinger,

la cuestión epistemológica: “¿Existen realmente los electrones en estas órbitas dentro del átomo? va a responderse con un decisivo *No*, a menos que prefiramos decir que plantear dicha cuestión no tiene ningún sentido. En efecto, no parece que tenga mucho sentido preguntar por la existencia real de algo, si se está convencido de que el efecto a través del cual la cosa se manifestaría a sí misma, en caso de que existiera, realmente *no* se observa.”⁸⁴³

840E. Schrödinger, “Conceptual Models in Physics and their Philosophical Value”, *Ibid.*, (p.119)

841E. Schrödinger, “Conceptual Models in Physics and their Philosophical Value”, *Ibid.*, (p. 121)

842 E.Schrödinger, “Conceptual Models in Physics and their Philosophical Value”, *Ibid.*, (p. 124)

843E. Schrödinger, “Conceptual Models in Physics and their Philosophical Value”, *Ibid.*, (p. 124)

Como vemos, la respuesta a aquella cuestión epistemológica fundamental es, para Schrödinger, que podemos decir que existe un objeto que no es observable si se observa el efecto a través del cual este objeto se manifiesta. Por tanto, una estructura mental no observable está justificada si se observa la consecuencia en que dicha estructura se muestra.

Retornando al tema de las órbitas electrónicas, Schrödinger manifiesta también que no se pueden aceptar porque están más allá de un límite “*absoluto*” impuesto por la nueva teoría cuántica—que, en este aspecto, tiene consecuencias filosóficas muy significativas, considera Schrödinger⁸⁴⁴—, por el cual “*la Naturaleza misma no contiene más que una definida cantidad de detalles estructurales, al menos si es accesible a cualquier observación en absoluto* y lo que se encuentra más allá de esto no es el objeto de la investigación científica”⁸⁴⁵. Es decir, ciertos detalles no se pueden encontrar en la Naturaleza, por el límite impuesto por la relación de indeterminación de Heisenberg

$$\Delta x \cdot \Delta p_x = h$$

siendo x la posición y p_x el momento en la dirección x

Esta relación, según Schrödinger⁸⁴⁶, nos hace comprender por qué son impracticables ciertas observaciones que, antes de conocer dicha relación, creíamos que eran realizables. Y, por otra parte, la relación de Heisenberg nos hace muy difícil utilizar conceptos que habíamos usado anteriormente. ¿Tiene sentido usar la noción de órbita de un electrón, cuando la posición y la velocidad de una partícula no pueden determinarse simultáneamente con exactitud?

Así, vemos que la relación de Heisenberg nos impide crear algunas construcciones mentales pero esto no significa que nos impida crearlas absolutamente todas. Según Schrödinger, a pesar de la relación de Heisenberg, siguen siendo necesarias y posibles como andamios estructurales en los

844E. Schrödinger, “Conceptual Models in Physics and their Philosophical Value“, *Ibid.*, (p. 125)

845E. Schrödinger, “Conceptual Models in Physics and their Philosophical Value”, *Ibid.*, (p. 125)

846Para Schrödinger la relación entre la relación de Heisenberg y la teoría de ondas es muy sencilla: Sea Δx la longitud de un grupo de ondas; siendo la razón $\Delta x / \lambda = l$ y denotando esta razón el número de crestas de onda en el grupo, y sustituyendo $p = h/\lambda$ se llega inmediatamente a $\Delta x \Delta p_x = h$. La dificultad para Schrödinger es la “actitud filosófica” que hay que tomar ante dicha relación. Hay dos alternativas: 1) que la materia *realmente* tenga naturaleza ondulatoria y entonces el principio de incertidumbre es una consecuencia de ella o 2) que el principio de incertidumbre es lo más fundamental y entonces la teoría ondulatoria es una consecuencia del principio. E. Schrödinger, “Conceptual Models in Physics and their Philosophical Value”, *Ibid.*, (p.129). Se ha tratado la equivalencia entre la mecánica cuántica de Heisenberg y la de Schrödinger en el apartado anterior sobre la mecánica de matrices y la mecánica de ondas.

que podamos situar nuestras percepciones. Sólo hay que tener en cuenta que la “existencia real” de estas estructuras ha de basarse siempre en la posibilidad de concebir ciertas observaciones.

Y, desde una perspectiva más amplia, si por la relación de Heisenberg o por otras razones una teoría científica deja dominios conceptuales vacíos en la imagen que presenta del mundo, lo que hay que hacer es formar una nueva imagen que no contenga dichos lugares. Nunca hay que prescindir de las imágenes en general, de los esquemas visualizables⁸⁴⁷, porque son lo que da carácter de inteligibilidad al mundo, una de las dos características fundamentales de la visión del mundo que ofrece la ciencia.

Por otra parte, el científico –para que su difícil tarea de comprender el mundo sea más sencilla– ha de realizar simplificaciones. Una de ellas consiste en eliminarse a sí mismo al elaborar la imagen del Universo, no tenerse en cuenta como sujeto de conocimiento y observar la totalidad del mundo como objeto. Por esta razón se llama “objetivación”⁸⁴⁸ a la segunda característica fundamental de la ciencia.

11.3 EL PRINCIPIO DE OBJETIVACIÓN

Por este principio el sujeto cognoscente se excluye, se elimina, de la Naturaleza que intenta conocer, es decir, se hace espectador de un mundo al que no pertenece. Así el sujeto retrocede al papel de observador externo al mundo y, por este procedimiento, éste se convierte en un mundo objetivo⁸⁴⁹.

Para dar a entender este rasgo peculiar de la ciencia, Schrödinger presenta el símil de un pintor que en un gran lienzo se representa a sí mismo como una figura marginal en un rincón. Este símil representa el doble papel de la mente. Por una parte, la mente es simbolizada por el artista, puesto que es la creadora que ha producido toda la obra y, por otra parte, es simbolizada por la figura insignificante que podría omitirse en el cuadro sin desvalorar el efecto del conjunto. Al margen de la metáfora, ésta es una de las contradicciones con que nos encontramos por no haber conseguido elaborar una imagen inteligible del mundo sin retirar de ella nuestra mente, la mente creadora de la

847E. Schrödinger, “Conceptual Models in Physics and their Philosophical Value”, *Ibid.*, (p.132)

848E. Schrödinger, *La Naturaleza y los griegos*. Edit Aguilar. Madrid (1961) (p. 102)

849E. Schrödinger, *Què és la vida? La ment i la matèria*. Edicions 62. Barcelona (1984) (p. 160)

imagen⁸⁵⁰.

Suponemos que este mundo –construido por nosotros– que nos rodea es un mundo real y suponemos también que es común a las otras conciencias. Ya Heráclito había hablado de ese mundo común: ”Los que hablan con la razón deben apoyarse en lo que es común a todos, como un ciudad en su ley”. “En la vigilia, los hombres tienen un mundo en común; en el sueño cada uno se vuelve hacia su mundo propio”⁸⁵¹.

Schrödinger ve en este último fragmento de Heráclito el criterio sobre el cual construimos el mundo real, el ser común a todas las conciencias⁸⁵². Y en este mundo común a todos impera una ley, el *λόγος*, no como en el mundo de los sueños, que constituye un mundo privado de cada persona donde no se sigue ninguna ley, donde no hay ninguna lógica.

Así, vemos que, al objetivar el mundo, situamos nuestro propio ser fuera del mundo, lo llevamos a la posición del espectador que no interviene en el juego. Schrödinger se pregunta ¿Por qué lo hacemos así? Y responde que lo hacemos de forma inconsciente. Para explicarlo ofrece su tesis ontológica monista:

Veamos: el *mundo real en torno nuestro y nosotros mismos* (o lo que es igual, nuestras mentes) estamos hechos del mismo material de construcción, ambos constamos de los mismos ladrillos, si se me permite la expresión, solamente que dispuestos en otro orden; percepciones sensoriales, imágenes de la memoria, imaginación, pensamiento...

Lo que sucede es lo siguiente: podemos pensar de estos *elementos* –si se me permite llamarlos así-- bien como constitutivos de la mente, de la propia mente de cada uno, bien como integrantes del mundo material, pero no podemos, o lo hacemos con gran dificultad, pensar ambas cosas al mismo tiempo. Para pasar del aspecto mental al material, o viceversa, tenemos, por así decirlo, que separar los elementos y reunirlos luego en un orden completamente distinto⁸⁵³

850E. Schrödinger, *Què és la vida? La ment i la matèria*, *Ibid.*, (p. 181)

851Kirk y Raven *Los filósofos presocráticos*. Edit. Gredos.

852E. Schrödinger, “La singularidad de la imagen del mundo de la ciencia natural” en *¿Qué es una ley de la Naturaleza?* *Ibid.*, (p. 84)

853E. Schrödinger, *La Naturaleza y los griegos*. Edit. Aguilar. Madrid (1961), (p. 103)

Para que le entendamos, Schrödinger ofrece un ejemplo, después de reconocer que es muy difícil dar ejemplos de una explicación tan abstracta y alejada del pensamiento cotidiano. Así, dirigiéndose al público al que está hablando, manifiesta que él lo primero que ve son los contenidos de su mente, por ejemplo, las personas que le escuchan, el guión de las ideas que está desarrollando en su conferencia,... Así, su propia mente, el conjunto de sus percepciones, es la primera realidad de la que él está seguro. Después ve los objetos materiales de su alrededor –por ejemplo, su brazo– que están constituidos no sólo por las sensaciones directas que tiene de ellos en aquel momento sino por otras posibles sensaciones que él puede imaginar; es decir, las percepciones “actuales” se “complementan” con percepciones “virtuales”, por ejemplo, el brazo, que ahora está doblado sobre la mesa, pienso que se puede alargar. Así, partiendo de la primera e indudable realidad, que es la mental⁸⁵⁴, según Schrödinger, elaboramos la realidad de un mundo material que suponemos que es objetivo y que es común a las otras conciencias. De esta manera explica Schrödinger que de forma inconsciente creemos que eliminamos nuestra mente al construir la imagen del mundo real que nos rodea.

Consciente de la dificultad de comprensión que presenta su explicación, Schrödinger ofrece otra comparación:

El siguiente símil no es muy bueno, pero es el mejor que se me ha ocurrido: a un niño se le entrega una caja muy complicada de construcciones de diversas formas y colores. Con ella puede formar una casa, una torre, una iglesia, la muralla china, etc. Pero no puede construir dos al mismo tiempo, porque necesita los mismos ladrillos, o al menos una parte común de ellos, para cada cosa⁸⁵⁵.

Por esta razón cree Schrödinger que el sujeto elimina su mente al observar el mundo objetivo, porque no puede mirar su mente y el mundo a la vez, porque necesita los mismos elementos para tener una y otra visión. Pero esta eliminación conlleva dificultades. En el cuadro de la ciencia objetiva, que está construido sobre la renuncia al observador –y por esta razón no lo incluye– se presentan graves deficiencias cuando a éste se lo pretende comprender.

Por esta razón, según Schrödinger, la ciencia no responde a preguntas que nos interesan

854Así, según Schrödinger, de la realidad mental y la material, por el principio de economía, es sólo necesaria una realidad, pues no se puede explicar la interacción entre ellas y, como la primera es indudable, hay que rechazar, estrictamente hablando, la segunda.

855E. Schrödinger, *La Naturaleza y los griegos. Ibid.*, (p. 104)

profundamente a los seres humanos, como preguntas sobre valores éticos, sobre cómo es el todo del que formamos parte, de dónde venimos, adónde vamos y qué somos en el fondo⁸⁵⁶

Otra dificultad relacionada con el principio de objetivación que asume la ciencia es, para Schrödinger, la "estéril" búsqueda del lugar en que la mente actúa sobre la materia y viceversa. El mundo material se ha construido "a costa de extraer de él el yo, es decir, la mente; la mente no forma parte de él, por ello no puede, evidentemente, interaccionar ni con él ni con cualquiera de sus partes"⁸⁵⁷. Schrödinger es contundente en su conclusión: no existe la interacción entre la mente y la materia. Spinoza ya había expresado la misma tesis con "precisión": "Ni el cuerpo puede determinar a la mente a pensar, ni la mente puede determinar al cuerpo a moverse, o a estar en reposo o a realizar alguna otra actividad"⁸⁵⁸

También C.G.Jung se había quejado, como Schrödinger, de la exclusión de la mente de nuestra imagen científica del mundo:

Toda ciencia (*Wissenschaft*) es, sin embargo, una función del alma en la que se arraiga todo conocimiento. El alma es el más grande de los milagros cósmicos, es el *conditio sine qua non* del mundo considerado como un objeto. Es muy sorprendente que el mundo occidental (salvo muy raras excepciones) parezca apreciar tan poco esta circunstancia. El aluvión de objetos externos de conocimiento ha arrinconado el sujeto; muchas veces hasta la aparente no existencia⁸⁵⁹

Así, Jung, como psicólogo que era, aún era más sensible que Schrödinger al problema de la objetivación y pedía un espacio vital para la psicología, lo cual exige una reconsideración del tema⁸⁶⁰. En cambio Schrödinger, como físico que era, consideraba que abandonar el principio de objetivación, que hemos mantenido durante siglos –y ha permitido el progreso de las ciencias– era peligroso porque podía llevar a "perderlo todo". Si se eliminara dicho principio sería necesaria una nueva actitud científica y se habría de construir una nueva ciencia.

856De nuevo vemos a Schrödinger como el científico humanista. El valor de la ciencia objetiva está supeditado al mandato délfico

857E. Schrödinger, *Què és la vida? La ment i la matèria. Ibid.*, (p. 161)

858Spinoza. *Ètica*, parte III, proposición II. *Ibid* (p 185)

859Citado por Schrödinger en *Què és la vida? La ment i la matèria, Ibid.*, (p. 162)

860Schrödinger sólo deja el problema apuntado. Podemos pensar que, si hubiera vivido en nuestros días y hubiera contemplado los progresos que la psicología ha realizado, no hubiera mantenido de forma tan contundente que la mente queda excluida de la imagen científica del mundo.

11.4 LA INTERFERENCIA SUJETO-OBJETO

Según la que Schrödinger consideraba escuela predominante⁸⁶¹ en mecánica cuántica, la de Copenhague, cuyos protagonistas eran, entre otros, Bohr, Heisenberg y Born, no podemos realizar ninguna afirmación objetiva sobre un objeto sin “ponernos en contacto” con él. Es decir, “no es posible obtener conocimiento sobre un objeto si se lo mantiene estrictamente aislado”⁸⁶². El contacto constituye una interacción entre sujeto y objeto que perturba al objeto. Esta perturbación, según la escuela de Copenhague, no es irrelevante ni la podemos controlar. Por tanto, hay propiedades del objeto que nunca podremos conocer, lo cual va contra el principio de la inteligibilidad de la Naturaleza que hemos visto que constituye la primera característica de la ciencia, según Schrödinger. Aunque éste admitía que los dos principios de la ciencia, el de inteligibilidad y el de objetividad, no son intrínsecamente necesarios y podrían cambiar, ello sería muy dificultoso porque han sido aceptados durante siglos. Schrödinger no creía que la mecánica cuántica exigiera cambiarlos. No pensaba que se hubiera llegado a la situación límite de que fuera necesario renunciar a los principios clásicos; porque creía que era posible construir nuevos modelos científicos que, por ejemplo, no exhibieran propiedades que no pudieran observarse simultáneamente.

De la inevitable e incontrolable interferencia entre sujeto y objeto la interpretación de Copenhague había extraído la consecuencia epistemológica de que no hay frontera entre sujeto y objeto. Pero ante ella Schrödinger respondió con un giro radical, el que le permitía su ontología monista: No hay interferencia sujeto y objeto, porque no hay diferencia entre sujeto y objeto. La creencia en la frontera sujeto-objeto surge de la aceptación del supuesto de la separación entre sujeto y objeto consagrada por el tiempo. Schrödinger admitía que era útil en la vida cotidiana y que también podía ser conveniente en la práctica de la investigación científica. Pero había que excluirla del pensamiento filosófico, porque lleva a absurdos como la noción kantiana de “cosa en sí”, que es una noción totalmente vacía de contenido. Hablando propiamente, no hay mundo existente y mundo percibido. El mundo me es dado de una sola vez: no uno existente y otro percibido. Nada se refleja. La imagen original y la reflejada son idénticas. El mundo dado en el espacio y el tiempo es sólo nuestra representación. En consecuencia, para Schrödinger, sujeto y objeto son una sola cosa.” Y no podemos decir que la barrera que los separa se haya roto como consecuencia de la experiencia

861E. Schrödinger, *Què és la vida? La ment i la matèria. Ibid.*, (p. 168)

862 E.Schrödinger, *Què és la vida? La ment i la matèria. Ibid.*, (p. 168)

reciente de la física, porque “esta barrera no existe”⁸⁶³.

Como vemos, Schrödinger también resolvió las dificultades conceptuales de la interpretación de la mecánica cuántica con metafísica monista, lo cual le alejaba de la mayoría de físicos de su época. Pretendía introducir la filosofía oriental de las *Upanishad* en la imagen de la ciencia occidental. Reconocía que ello no era fácil, porque las *Upanishad*, al identificar el todo con Dios y con el alma, presentan un componente místico, y el misticismo en Occidente es, en general, considerado acientífico, porque, como hemos visto, la ciencia occidental está construida sobre el principio de objetivación.

12. CAUSALIDAD Y AZAR

La reflexión sobre el principio de inteligibilidad lleva al problema de la causalidad y el azar. Ambas nociones desempeñan un papel central en la comprensión del mundo, puesto que con ellas el científico pretende responder a la demanda de inteligibilidad que le presenta la exigencia de una imagen científica del mundo.

Schrödinger explica nuestra tácita y habitual aceptación del principio de la causalidad en nuestra vida cotidiana como resultado de un proceso adaptativo ⁸⁶⁴. El hombre se encuentra en un medio donde es consciente de que los cambios que éste presenta son muy importantes para él. La experiencia –tanto en la lucha de su vida diaria como en la lucha por el progreso en la investigación científica⁸⁶⁵– le muestra que los procesos que se efectúan en su medio no suceden de forma arbitraria sino que presentan una notable regularidad, es decir, ciertos rasgos de los acontecimientos están siempre vinculados a otros. El ser humano trata entonces de captar la esencia de esta regularidad, pues comprende que su conocimiento le será útil. Y entonces se da cuenta de que determinadas circunstancias que preceden a un fenómeno A observado son invariables y, en cambio, otras son variables. Percibe que el grupo invariable siempre va seguido de A y esto le hace afirmar que este conjunto constante de circunstancias es la causa de A⁸⁶⁶. Y, más allá de la experiencia, el ser humano supone que aún en los casos en que no ha logrado encontrar la causa de un fenómeno

863E. Schrödinger, *Què és la vida? La ment i la matèria. Ibid.*, (p. 170)

864E. Schrödinger, *¿Qué es una ley de la Naturaleza?, Ibid.*,(p. 15)

865Schrödinger presenta a menudo un paralelismo entre la manera de pensar que permite entender la vida cotidiana y la del científico que le permite entender su práctica investigadora.

866Schrödinger escribe la “*la causa condicionante de A*”

también tiene que haberla. Este postulado que el hombre establece de forma inconsciente constituye el llamado principio de causalidad.

Pero, si examinamos este principio con atención, como hizo Hume, vemos⁸⁶⁷ que no podemos percibir ni comprender una conexión necesaria entre causa y efecto. La causación de un fenómeno por otro, como el calentamiento de la superficie de la tierra por el ascenso del sol, no se puede percibir directamente. Sólo podemos percibir que un fenómeno, la subida del sol, siempre va seguido de otro fenómeno, el calentamiento de la superficie de la tierra. Vemos, a través de la experiencia, que en el mundo unos fenómenos suceden a otros, aunque no sea de forma evidentemente necesaria. Observamos que aparecen regularidades que tratamos de sintetizar a través de leyes científicas.

Así vemos que Schrödinger sigue a Hume, cuya “cautelosa”⁸⁶⁸ versión de la causalidad⁸⁶⁹ no es más que una inducción de la experiencia. La ciencia empírica se basa en la inducción. Pero ¿en qué se basa la inducción? Sólo en la experiencia, en la observación de que en el pasado ha funcionado y ha sido útil, porque ha ayudado al ser humano en su lucha diaria. Mas, lógicamente, no se basa en nada. La inducción sólo se basa, inductivamente, en el éxito que ha tenido en el pasado. Es, por tanto, un círculo vicioso.

La mecánica estadística⁸⁷⁰, como hemos visto, también había planteado dudas sobre la existencia objetiva de las regularidades que expresan las leyes de la Naturaleza. La base de estas dudas es la inmensa cantidad de átomos y moléculas que participan en los procesos físicos cuya observación sólo nos permite extraer leyes estadísticas. Éstas no siempre se cumplen con exactitud y a veces en los fenómenos se observan desviaciones de ellas, pero dichas diferencias presentan el carácter y la magnitud que la teoría estadística ya había calculado previamente. Un ejemplo de la naturaleza de las leyes estadísticas lo encontramos en las compañías de seguros⁸⁷¹. Los daños contra los que nos aseguramos –robos, incendios, accidentes– dependen de muchísimos factores y se muestran como fruto del azar. La compañía de seguros no distingue entre el tipo de perjuicio –si es un incendio, por

867E. Schrödinger, “The Law of Chance” en *Science and the Human Temperament. Ibid.*, (p. 33)

868E. Schrödinger, “La singularidad de la imagen del mundo de la ciencia natural”, *Ibid.*, (p. 76)

869Porque Hume advierte que la suposición no siempre se cumple necesariamente, puesto que no tenemos impresión de la conexión necesaria entre causa y efecto. D.Hume *Tratado de la Naturaleza humana* Parte III. Sección II. Editora Nacional. Madrid (1977) (p.175). La visión que de la causalidad tiene Hume le parece a Schrödinger la única “fidedigna”. E. Schrödinger, “La singularidad de la imagen del mundo de la ciencia natural”, *Ibid.*, (p. 76)

870Como se ha dicho en el primer apartado, dedicado a la herencia de Boltzmann y Exner.

871E. Schrödinger, “The Law of Chance” en *Science and the Human Temperament. Ibid.*, (p. 38)

ejemplo, o un robo—. Sólo le interesa el porcentaje de asegurados que van a sufrir un daño y van a tener que ser compensados. Y este porcentaje puede ser previsto a partir de las regularidades estadísticas de los años anteriores. Y así el azar está en la base de la regularidad, porque del azar surge la ley.

Volvamos a la cuestión de la causalidad en las leyes de la Naturaleza. Ante ella, según Schrödinger, nos encontramos con un dilema⁸⁷², pues se dan dos posibilidades. La primera es que aceptemos que las leyes de la Naturaleza son de carácter estadístico y entonces el principio de causalidad no es, como mantenía Hume, lógicamente correcto sino que sólo es un producto psicológico generado por el hábito de observar la regularidad estadística de los hechos –por inducción–. En el fondo, todos los fenómenos suceden por azar, por casualidad, y no se sabe por qué suceden, porque el azar no está determinado por ninguna ley, no es explicable. Schrödinger se refería a esta concepción con estas palabras:

la investigación física ha mostrado clara y definitivamente que el *azar* es, por lo menos en la abrumadora mayoría de los procesos naturales, la raíz de esa regularidad y de esa invariabilidad que nos han llevado a establecer el postulado de causalidad universal, en vista de su estricto ajuste a las leyes⁸⁷³.

Así⁸⁷⁴, las leyes de la Naturaleza surgen estadísticamente a partir de los fenómenos en que intervienen multitud de átomos que experimentan multitud de procesos que son casuales e inexplicables. Por esta razón, hay que eliminar de nuestra imagen científica del mundo la idea de la conexión causal entre fenómenos naturales. El azar está en la base de la Naturaleza y las regularidades causales que encontramos han surgido estadísticamente de la cooperación de miríadas de casualidades.

La segunda posibilidad es que no tengamos en cuenta la crítica de Hume al principio de causalidad

y aceptemos que el principio de causalidad es *a priori*, es decir, es universal y necesario para entender el mundo, porque, en el fondo, el mundo se rige por leyes de causa-efecto. Entonces pensaremos que, aunque no lo podamos observar, en realidad cada proceso se rige por una rígida

872E. Schrödinger, “The Law of Chance”. *Ibid.*, (p. 40)

873E. Schrödinger, *¿Qué es una ley de la Naturaleza?* *Ibid.*, (p.17)

874Como vemos, el carácter estadístico de las leyes naturales llevaba a Schrödinger, como previamente había llevado a Exner, a dudar del principio de causalidad.

causalidad. Así, Schrödinger se refería, en 1922 a esta concepción⁸⁷⁵ con las palabras siguientes:

la opinión general es que, en realidad, descubriríamos que el proceso individual –por ejemplo, la colisión de dos moléculas de gas– *está* determinado por una rígida causalidad, si pudiésemos seguirla, lo mismo que el resultado de una vuelta de la ruleta no sería cosa del azar para quien conociese exactamente el ímpetu dado a la rueda, la resistencia del aire, la fricción del eje, etc, y supiese usar estos datos⁸⁷⁶.

Si los fenómenos que observamos parecen fruto del azar es porque en ellos actúan innumerables elementos que son determinados por innumerables causas parciales que no somos capaces de observar. El azar es un término que usamos, por nuestra propia incapacidad, para encubrir y reunir las numerosas causas que desconocemos pero que, en el fondo, sabemos que existen. Necesitamos los métodos estadísticos para encontrar leyes en la Naturaleza, pero ésta en el fondo se rige por el principio de causalidad.

Ante este dilema, Schrödinger mantenía que, por una parte, el razonamiento igualmente nos lleva a aceptar una alternativa como la otra, es decir, a concluir que el azar deriva de la ley o que la ley deriva del azar y, por otra parte, es difícil pensar que se pueda decidir a través de algún experimento.

Durante años se había aceptado la segunda posición. La mecánica estadística no había abandonado la causalidad y el determinismo y la mayoría de físicos asumía que si las condiciones iniciales –por ejemplo, la posición y la velocidad– de cada molécula fueran completamente conocidas en un principio y se pudiera hacer un cálculo matemático exacto de todas las colisiones entre las moléculas, entonces se podría predecir lo que iba a ocurrir. Pero si los físicos se habían de limitar a leyes estadísticas era por la imposibilidad práctica⁸⁷⁷ que tenían de conseguir tanto lo uno como lo otro. Así se suponía que la naturaleza era, en esencia, determinista, es decir, todos los fenómenos en el fondo estaban determinados por leyes estrictas causales.

875El principio de causalidad en aquel momento era aceptado por la mayoría de científicos. Por esta razón Schrödinger no publicó su conferencia.

876E. Schrödinger, *¿Qué es una ley de la Naturaleza?* *Ibid.* (p. 22)

877E. Schrödinger, “Determinism in Physics” en *Science and the Human Temperament Ibid.* (p 55)

Como hemos visto⁸⁷⁸, F Exner fue el primero que levantó sospechas sobre este fondo determinista, que planteó dudas sobre la suposición de que los fenómenos en última instancia estaban determinados por estrictas leyes causales. Lo hizo en 1919⁸⁷⁹, es decir, unos años antes de que Heisenberg sacara a la luz su relación de indeterminación. No se prestó atención a la reflexión de Exner. Y cuando Schrödinger, en su lección inaugural de 1922, la defendió no fue comprendido por el público⁸⁸⁰. Al final Schrödinger, aceptando las limitaciones del tratamiento que había hecho en su conferencia de un problema tan complejo⁸⁸¹ manifestaba:

La falta de tiempo me impide profundizar más en esta cuestión. He de limitarme a la siguiente observación general, que al mismo tiempo resume concisamente las conclusiones a las que hemos llegado.

Lo que Exner afirmó equivale a esto: es perfectamente posible que las leyes de la naturaleza sean en conjunto de carácter estadístico. La ley absoluta que reside detrás de la ley estadística, y tenida por evidente en la actualidad por casi todo el mundo, *va más allá del ámbito de la experiencia*. Tal doble fundamento del curso ordenado de los acontecimientos en la naturaleza, es improbable en sí mismo. *El peso de la demostración les toca a quienes defienden la causalidad absoluta, no a quienes dudan de ella*. Una actitud de duda a este respecto es, hoy por hoy, *la más natural*.⁸⁸²

La actitud de duda que en aquel momento era, según Schrödinger, la más justificada era debida a la mecánica cuántica que por principios, por razones teóricas, negaba la causalidad y el determinismo⁸⁸³. Especialmente por las relaciones de indeterminación de Heisenberg, que impiden conocer con precisión simultáneamente propiedades como la posición y la velocidad de una

878En el apartado “El legado de Boltzmann y Exner” de este trabajo

879En *¿Qué es una ley de la Naturaleza* Schrödinger escribe que fue en 1919 y en *Indeterminism in Physics* en 1918

880 Schrödinger manifestó en diversas ocasiones que las relaciones de indeterminación de Heisenberg – cuya validez aceptaba plenamente-- podían considerarse como una confirmación de las ideas de Exner. Y no fue hasta 1929 que Schrödinger se decidió a publicar su lección inaugural de 1922 con la siguiente nota introductoria:”Esta charla no fue publicada en su momento.La posterior aparición y desarrollo de la mecánica cuántica la ha colocado en el foco de interés, sin que, incidentalmente, el nombre de Exner haya sido mencionado”, según E. Schrödinger en “*Gesammelte Abhandlungen*”. Vol. 4 (p295)

881Pero Schrödinger nunca encontró tiempo para elucidar sus ideas, que en esta conferencia trató brevemente, y reelaborar dicha conferencia en un ensayo filosófico más completo, según W.Moore, *Ibid* (p154) .Por otra parte, hemos visto que a lo largo de los años trató en diversas ocasiones sobre este tema, pero nunca de forma sistemática, es decir, nunca dió forma definitiva a sus ideas al respecto y nunca se decidió por mantener una postura única. Además, a menudo, encontramos en sus escritos una posición utilitaria, pues, tratando de problemas como el realismo y la causalidad, declara que un científico ha de usar las nociones que mejor le permitan conseguir su objetivo, que es acercarse a la Naturaleza.

882E.Schrödinger, *¿Qué es una ley de la Naturaleza?* Fondo de cultura económica.México DF(1962) (p 26)

883En el apartado 6 del capítulo dedicado a Heisenberg de este trabajo vemos que a partir de la relación de indeterminación Heisenberg derivaba la inaplicabilidad de la ley de causalidad, porque la impredecibilidad de los valores iniciales impedía la predictibilidad de los valores futuros.

partícula; por tanto, como no se pueden conocer sus condiciones iniciales no se puede determinar el movimiento posterior de la partícula. Para Schrödinger, como para Heisenberg, la indeterminación de los valores iniciales impedía la predictibilidad de los valores futuros.

Pero Schrödinger también presentaba otros argumentos. Uno de ellos surge del carácter ondulatorio que él atribuía a la realidad. Según la mecánica ondulatoria el estado de un sistema físico queda determinado, unívocamente y sin ambigüedad para todo el porvenir, por el estado inicial; pero este estado y los que le siguen carecen de precisión, si se consideran desde el punto de vista clásico. Por ejemplo, consideremos un sistema simple, como un fotón o un electrón. Su estado inicial, su función ψ , se halla representado por un tren de ondas que, si se encuentra un pequeño obstáculo, se transformará por difracción en una onda esférica que emana del obstáculo y se propagará sobre una parte del espacio cada vez mayor. Entonces se podría encontrar la partícula en diferentes direcciones, con diferentes probabilidades, que estarían determinadas por la intensidad que la onda esférica poseería en las diferentes direcciones. Esto significa que si se repitiera la experiencia, es decir, si se preparara la partícula de la misma manera antes de ser lanzada contra el obstáculo no produciría siempre el mismo efecto. Es lo que se conoce como defecto de igualdad, porque hay que “admitir que condiciones de estado inicial *idénticas* predisponen efectos *diversos*”⁸⁸⁴.

Y otro argumento que también presentaba Schrödinger contra el determinismo era el siguiente: aún admitiendo la tesis determinista de que dado un conocimiento completo del estado de un sistema aislado se puede predecir exactamente su comportamiento futuro, hay que admitir que la Naturaleza es complicada y por ello un sistema físico no puede ser determinado por un número finito de observaciones. Por tanto, todo lo que se le puede conceder al determinismo es que una infinita acumulación de observaciones permitiría determinar el sistema⁸⁸⁵. Pero en la práctica sólo se puede conseguir un número finito de observaciones.

Así, la mecánica cuántica había puesto de actualidad el debate sobre el determinismo y había inclinado la balanza a favor del azar y el indeterminismo⁸⁸⁶, como había propuesto F. Exner en un principio y posteriormente había defendido la escuela de Copenhague.

884La mecánica ondulatoria había llevado a la cuestión del defecto de causalidad, que Schrödinger trató en “La nueva mecánica ondulatoria”, *Ibid* (p 508)

885E. Schrödinger, *Indeterminism in Physics*” *Ibid.*, (p. 64)

886Parece ser que por esta razón fue publicada la conferencia *¿Qué es una ley de la Naturaleza*

Por otra parte, el indeterminismo de la mecánica cuántica había sido utilizado para defender el libre albedrío. Había significado una esperanza para resolver un problema clásico, la justificación de la libertad del ser humano, la explicación de por qué éste se siente libre y responsable, explicación que era difícil si se veía al hombre como un ser determinado en un mundo completamente determinado. En cambio, en un mundo en que era impensable predecir el futuro era fácil entender la libertad y la responsabilidad del ser humano. Pero Schrödinger consideraba que la esperanza de fundamentar el libre albedrío del hombre en el indeterminismo de la Naturaleza era una simple ilusión⁸⁸⁷ por las siguientes razones.

Si analizamos la situación vemos que pensamos de formas muy distintas cuando observamos a otras personas y cuando nos observamos a nosotros mismos. En el primer caso si vemos que dos personas diferentes –o la misma persona en diferentes ocasiones– reaccionan de forma diferente en unas condiciones que, al menos aparentemente, son las mismas, tendemos a explicarlo por una real, aunque desconocida, diferencia de condiciones, en las que se incluyen las diferencias de carácter. Aquí no hay ningún indeterminismo. Simplemente somos como un físico clásico que busca la causa de un fenómeno natural. La diferencia consiste en que aquí a la causalidad se la llama *motivación*.

En cambio, en el segundo caso, cuando nos observamos a nosotros mismos, desempeñamos, un papel muy diferente al del físico clásico determinista. Entonces nos sentimos auténticamente libres. Y en esta sensación de libre albedrío Schrödinger distingue dos rasgos diferentes. Por una parte, el hecho de que yo sé lo que voy a hacer, no por previa experiencia –como el científico determinista que sabe lo que va a ocurrir porque lo ha observado en repetidas ocasiones en el pasado– sino porque soy yo quien lo he decidido, quien quiere hacerlo, lo cual lleva al segundo rasgo característico del libre albedrío, el hecho de que yo me siento responsable de lo que voy a hacer. Pero antes de tomar mi decisión definitiva, antes de saber lo que voy a hacer, he contemplado diferentes posibilidades, entre las cuales tenía que elegir. Sentía que podía realizar varias acciones diferentes. Y esta posibilidad de elección ha sido interpretada por algunos como una realización en el ser humano del indeterminismo fundamental de la Naturaleza. Esta libertad para escoger mi actuación futura es una clave para la conexión del ser humano con la mecánica cuántica.

Otra clave para relacionar el libre albedrío y el indeterminismo cuántico ha sido pensar que el ser humano está compuesto de átomos. Los átomos, en el fondo, se comportan de forma indeterminista.

887E. Schrödinger, *Indeterminism and Free Will*. *Nature* July 4, 1936

Por tanto, el hombre también se comporta de forma indeterminista, es decir, tampoco está determinado. En consecuencia, es libre.

Mas, según Schrödinger, la libertad del hombre no tiene nada que ver con el indeterminismo cuántico. Lo muestra con un razonamiento al absurdo. Veámoslo. Si fuera verdad que el libre albedrío se deriva del indeterminismo de la Naturaleza entonces esto llevaría a dos consecuencias. Una consecuencia es que mis acciones habrían de seguir la relación de indeterminación de Heisenberg, que, por otra parte, yo podría alterar con mi decisión personal y mi fuerza de voluntad. Por ejemplo, si mi acción de fumar o no fumar antes del desayuno dependiera del principio de indeterminación de Heisenberg, éste estipularía una probabilidad que yo podría invalidar con mi conducta. Es decir, si mis decisiones son regidas por el principio de indeterminación y yo puedo alterar mis decisiones ¿significa esto que yo puedo alterar dicho principio? ¿Si yo no hago lo que quiero sino lo que estipula el principio de Heisenberg, por qué yo me siento responsable de mis actos?

Así, la suposición de que el libre albedrío es, en el fondo, el indeterminismo aplicado al ser humano implica consecuencias absurdas. Por tanto, no podemos aceptar dicha suposición, por muy sugerente que en principio nos parezca

Por otra parte, si nos observamos a nosotros mismos vemos que nuestras verdaderas decisiones pueden tener diferentes motivaciones, pero no son tomadas por azar. Por esta razón nos sentimos responsables de ellas, porque cuando las tomamos nos sentimos justificados para tomarlas. En consecuencia, el libre albedrío nada tiene que ver con el indeterminismo cuántico⁸⁸⁸.

El filósofo E. Cassirer había justificado claramente esta conclusión. Schrödinger la recordaba con las palabras siguientes:

el libre albedrío del hombre conlleva, como factor preponderante, la conducta ética del hombre. Si suponemos que los hechos físicos en el espacio y el tiempo no están en gran medida estrictamente determinados y están del todo sujetos al azar, como cree la mayoría de los físicos de hoy, esta faceta

⁸⁸⁸Desde otro punto de vista, desde la perspectiva biológica, hay que tener en cuenta, según Schrödinger, que los procesos de la vida y de la consciencia son demasiado vastos y complejos para que en ellos se puedan percibir las relaciones de indeterminación de Heisenberg.

aleatoria de los hechos en el mundo material sería indudablemente (dice Cassirer) *la última en invocarse como correlato físico a la conducta ética del hombre*. Porque, de hecho, lo es todo menos aleatoria; en realidad, está profundamente determinada por motivos que van desde los más viles hasta los más sublimes, desde la codicia y el despecho hasta el auténtico amor al prójimo o la sincera devoción religiosa.⁸⁸⁹

13. EL REALISMO DE SCHRÖDINGER

La posición de Schrödinger ante el realismo es intrigante. Por una parte, tan pronto como en 1925⁸⁹⁰ elaboró su monismo, uniendo la influencia de Mach y la influencia de la espiritualidad vedanta que había recibido a través de Schopenhauer. Se basaba, como hemos visto, en el argumento de que, por el principio de economía, aceptar la existencia de una realidad material que provoca nuestras ideas es superfluo e innecesario. Pero, por otra parte, su lenguaje⁸⁹¹, especialmente en sus artículos científicos y en su correspondencia, era realista. Así, por ejemplo, Schrödinger, en la cuarta parte de su artículo de 1926, escribía que

a menudo hemos hablado previamente de manera tan intuitiva y concreta de las “vibraciones- ψ como de algo totalmente real. Pero hay algo tangiblemente real tras la presente concepción también, esto es, las muy reales fluctuaciones electrodinámicamente efectivas de la densidad eléctrica del espacio.⁸⁹²

Y en una carta a Einstein en 1950 Schrödinger manifestaba:

Me parece que el concepto de probabilidad está terriblemente malinterpretado estos días. La probabilidad seguramente tiene como su substancia un enunciado de que si algo *es* o *no es* el caso. Una aserción probabilística presupone la plena realidad de su materia [...] Pero la gente de la mecánica cuántica a veces actúa como si los enunciados probabilísticos fueran a ser aplicados *sólo* a hechos cuya realidad es vaga⁸⁹³.

Como vemos, Schrödinger ante la escuela de Copenhague frecuentemente representaba el papel de

889E. Schrödinger, *Ciencia y Humanismo*. Tusquets Editores Barcelona (2009) (p 76)

890Como manifiesta en “La búsqueda del camino”

891M. Bitbol . *Schrödinger's Philosophy of Quantum Mechanics*. *Ibid* (p. 13)

892E. Schrödinger, “Quantisation and Proper Values- IV” en *Collected Papers on Wave Mechanics*. *Ibid* (p 120)

893 Carta de Schrödinger a Einstein del 18 de Noviembre de 1950. *Letters on Wave Mechanics*, editado por K.Przibram. Philosophical Library (1967) (p. 37)

realista, parecía que defendiera la existencia de la realidad material externa. Pero más abajo, en la misma carta, escribía: "El significado metafísico de esta realidad no nos interesa". Entonces, ¿qué era la realidad de un mundo externo para Schrödinger, que había aceptado el monismo? Para responder a esta pregunta Schrödinger se servía de la concepción de Mach. La realidad, para él, era un conjunto de elementos machianos, "percepciones sensoriales, imágenes de la memoria, imaginación"⁸⁹⁴. El concepto de la totalidad del mundo material era una construcción⁸⁹⁵ de nuestra mente, que guiaba nuestros pensamientos y nuestro comportamiento. La noción de realidad externa era necesaria porque sin ella no podríamos dar un solo paso en nuestra vida cotidiana y, como escribía Schrödinger en la carta anteriormente mencionada, sin ella, es decir, "abandonando este modo de pensar y antes de haber encontrado otro que fuera equivalente, los descubrimientos de los observadores individuales se alejarían sin conexiones"⁸⁹⁶. Como vemos, el realismo de Schrödinger era ante todo práctico, era más epistemológico que metafísico.

Así, según Schrödinger, la construcción del mundo externo es una concepción que tenemos arraigada por el proceso de abstracción que nuestra mente realiza a partir de nuestras experiencias desde el momento en que nacemos. Es producto de un hábito inconsciente, no es fruto del razonamiento. De esta manera formamos conceptos generales y así construimos el concepto más general de realidad externa material. Con este concepto unimos diferentes percepciones sensoriales que hemos experimentado y las completamos con nuevas percepciones, que aunque aún no las hayamos experimentado, las suponemos para formar una imagen unificada de todo lo material. Así construimos nuestra imagen de la realidad, pero la realidad misma permanece fuera de nuestro alcance.

Schrödinger lo explicaba así:

Esta situación nos ha llevado a la concepción comunmente aceptada de que *algo* se distribuye en el espacio de una manera definida y en un orden bien definido, la distribución o arreglo u orden cambiante con el tiempo de una manera definida y este algo cambiante es la realidad objetiva en el fondo del

⁸⁹⁴Los mismos elementos, por cierto, que, hablando con rigor, constituyen nuestras mentes. E. Schrödinger . *La Naturaleza y los griegos. Ibid* (p 103)

⁸⁹⁵Además, a la hipótesis de un mundo real externo le hemos añadido los supuestos de que éste es inteligible y objetivo, es decir, que nuestra mente está fuera de él pero puede comprenderlo, como hemos visto en el apartado de la imagen del mundo que ofrece la ciencia natural.

⁸⁹⁶Es lo que Schrödinger criticaba a la escuela de Copenhague, pues a continuación escribía: "La actual mecánica cuántica no ofrece ningún equivalente. No es consciente del problema". A Schrödinger le parecía que la escuela de Copenhague no ofrecía ninguna conceptualización.

“mundo que nos rodea” incluyendo, desde luego, nuestros propios cuerpos (ya que tu cuerpo forma parte de mi alrededor y el mío forma parte del tuyo). Llamando a esto la realidad objetiva las personas quieren decir que lo que han descubierto, por inspección directa o por métodos más sofisticados, sobre las posiciones relativas de partes de este algo, sobre la configuración geométrica y su cambio en el tiempo, son hechos duros e indudables; o puesto más cautelosamente (ya que podemos a veces sucumbir a un error) que estos descubrimientos son *sobre* hechos duros e indudables y son verdaderos o falsos según si todos están de acuerdo con ellos. Lo que este *algo* es no puede decirse; llamándole materia o campo o lo que sea, sólo le damos un nombre.⁸⁹⁷

Como escribía a Einstein en la carta antes citada: ”La concepción de un mundo que realmente existe está basada en el hecho de que hay una experiencia común de largo alcance de muchos individuos, en efecto, de todos los individuos que se encuentran en la misma o similar situación con respecto al objeto que interesa”

14.CONCLUSIÓN DEL CAPÍTULO

Después de ver la riqueza y diversidad de aportaciones que Schrödinger realizó como físico y como filósofo llegamos a una doble conclusión.

Por una parte, la trascendencia de su contribución a la mecánica de ondas es indiscutible, pues, como dijo M. Planck, su ecuación de onda ha ofrecido “la base de la moderna mecánica cuántica, en la que desempeña el mismo papel que las ecuaciones establecidas por Newton, Lagrange y Hamilton, en la mecánica clásica”⁸⁹⁸.

Y, por otra parte, su aportación filosófica también ha tenido trascendencia en el amplio campo del pensamiento humano en general. Pero dicha aportación no ha tenido una dirección única y clara. Así hemos visto que fue indeterminista como Exner, pero contrario a la interpretación estadística de Born, porque Schrödinger, aunque aceptaba que la función de onda ψ constituía un instrumento matemático para calcular la probabilidad de hechos experimentales, estaba también convencido de que dicha función tenía un significado, aunque nunca consiguió clarificar dicho significado. Así, pues, Schrödinger no admitía que la interpretación de Born fuera la última palabra, porque le

897Tercera conferencia W.James. E. Schrödinger, “The Interpretation of Quantum Mechanics”(p. 145)

898M..Planck .The *Universe in the Light of Modern Physics* , (p. 29). Londres, 1931, George Allen and Unwin, Ltd.

parecía que se había ganado poco con dicha interpretación, que poco aportaba, ya que ni ofrecía auténtica comprensión de los procesos naturales ni capacidad de predicción de los hechos individuales. Esta incapacidad de la mecánica cuántica era según Schrödinger, uno de los vacíos⁸⁹⁹ que dejaba la imagen del mundo que ofrecía la ciencia de su época, pero no era un hueco definitivo. Por tanto, se había de seguir buscando la manera de llenarlo, es decir, se había de seguir buscando una comprensión del mundo más completa.

Hemos visto que Schrödinger manifestó reiteradamente que creía, como Exner, que estos procesos naturales son en el fondo indeterministas, pero, en cambio, su ecuación de onda es determinista⁹⁰⁰ y aceptó en diversas ocasiones el principio general de causalidad. Compaginó estas posiciones aparentemente antagónicas con la misma actitud pragmática con la que hemos visto que compaginó su monismo metafísico y su realismo práctico. De la misma manera que mantenía que, al margen de su ontología fundamental, un físico había de trabajar como si tuviera una concepción realista porque ésta es la que más le conviene para potenciar su espíritu investigador, así también Schrödinger mantenía que había de seguir el postulado de la causalidad si resultaba útil. Así, pues, según Schrödinger, la cuestión de si los procesos naturales son causales o no lo son no se refiere al carácter real de dichos procesos, sino a si la aceptación de la causalidad constituye la predisposición mental más conveniente o no para acercarse a la comprensión de la naturaleza⁹⁰¹. Schrödinger comparaba esta actitud con la que había adoptado H.Poincaré al mantener que somos libres de aplicar la geometría euclidiana o una geometría no euclidiana al espacio real sin haber de temer ninguna contradicción con los hechos. No hay geometría correcta ni geometría incorrecta. Sólo hay una geometría más conveniente y una menos conveniente.

Como hemos visto, Schrödinger pensaba⁹⁰² que “difícilmente nos podemos imaginar unos experimentos que nos permitieran definitivamente decidir si la Naturaleza está absolutamente determinada o parcialmente indeterminada”⁹⁰³ y lo más que se podía decidir es si una concepción o la otra implicaba una comprensión más simple y clara de los hechos que percibimos en la Naturaleza. Y esto último, en definitiva, es lo que interesa al físico, porque el objetivo de su ciencia

899E.Schrödinger, *Science and the Human Temperament. Ibid* (p. 131). Este tema ha sido tratado en el apartado de “La imagen del mundo que ofrece la ciencia natural” de este trabajo.

900Puesto que según esta ecuación, el estado de un sistema físico queda determinado, unívocamente y sin ambigüedad, por su estado inicial

901Como expuso Schrödinger en la conferencia con la que entró a formar parte, en 1929, de la Academia Prusiana de la Ciencia, que se cita en E.Schrödinger, *Science and the Human Temperament. Ibid* (p. 15)

902Este tema ha sido tratado en el apartado “Causalidad y azar” de este trabajo

903E.Schrödinger, *Science and the Human Temperament, Ibid* (p. 16)

es descubrir las mínimas y más simples leyes fundamentales posibles a las cuales poder referir cada uno de los fenómenos del complejo mundo empírico.

CAPÍTULO 5. Marco social del debate sobre la causalidad

ÍNDICE DEL CAPÍTULO

1	Introducción del capítulo.....	304
2	Individualidad, visualización y acausalidad.....	304
3	El surgimiento y la aceptación de la acausalidad.....	306
4	Las tesis de Forman.....	309
5	Conclusión del capítulo.....	314

1. INTRODUCCIÓN DEL CAPÍTULO

Después de realizar, en los capítulos anteriores, una exploración interna, una visión “desde dentro” de la concepción filosófica de cuatro de los creadores de la interpretación de la mecánica cuántica, tomaremos una perspectiva diferente, sociológica, “desde fuera”, porque, como manifestaba Schrödinger⁹⁰⁴, “el científico no puede olvidarse de su actividad mundana cuando entra en su laboratorio” y en cada época histórica hay líneas de actuación y de pensamiento que son más atractivas, es decir, modas que influyen tanto en arte, como en política o en ciencia. Pero la influencia de estas modas intelectuales a menudo no se percibe en la época en la que actúan puesto que es una influencia que afecta a las personas de forma inconsciente –y también a las que se dedican a la física--, sin que éstas se den cuenta, puesto que cuando viven inmersas en un determinado ambiente cultural normalmente no son conscientes del espíritu que impregna dicho ambiente.

A continuación trazaremos unas pinceladas de la influencia del ambiente social en la creación de la interpretación de la mecánica cuántica, puesto que, aunque la perspectiva sociológica no haya constituido un objetivo prioritario de nuestra investigación, nos ha ayudado a completarla

2.INDIVIDUALIDAD, VISUALIZACIÓN Y ACAUSALIDAD

Forman⁹⁰⁵ ha estudiado exhaustivamente la influencia del ambiente cultural alemán en el nacimiento de la mecánica cuántica, que fue en gran manera una creación germana. Ha visto, en el ambiente intelectual de la época, tres valores culturales característicos que muchos de los creadores de esta teoría exhibieron o al menos pretendían exhibir⁹⁰⁶: individualidad, visualización y acausalidad. En nuestra investigación hemos encontrado el primer elemento en los escritos de Bohr⁹⁰⁷, quien lo justifica basándose en el postulado cuántico, la esencia de la teoría cuántica, según Bohr. La interacción entre el dispositivo de observación y el objeto observado, debido al rango de las dimensiones del dominio atómico, no se puede despreciar ni controlar. Así, por la perturbación que el instrumento provoca en el objeto, cada proceso cuántico es diferente, único, individual. De dicha

904E.Schrödinger. *¿Es la ciencia una moda de los tiempos?* en *Science, Theory and Man* . New York (1957) (p.99)

905P.Forman. *Cultura en Weimar, causalidad y teoría cuántica, 1918-1927*. Madrid: Alianza Editorial, 1984

906J.T.Cushing. *Quantum Mechanics*. Chicago: University of Chicago Press, 1994 (p.98)

907N.Bohr. *La teoría atómica y la descripción de la naturaleza* . *Ibid* (p.101)

interacción proviene la dificultad para entender los procesos cuánticos, ya que para entender necesitamos reducir los elementos concretos e individuales a categorías generales, agruparlos en nociones universales, y establecer relaciones entre éstas.

A través de nuestra investigación también hemos encontrado el segundo valor característico de la época, la visualización, la *Anschaulichkeit*, de los modelos científicos. Así, hemos visto que la mayoría de autores estudiados buscan que sus teorías sean *anschaulich*, visuales, intuitivas, pictóricas. Schrödinger estaba satisfecho de que su teoría fuera considerada –por ejemplo, por Lorenz-- más *anschaulich* que la mecánica de matrices de Heisenberg, porque retornaba a la continuidad de la física clásica, pero lamentaba que el espacio en el que se encontraban las ondas, el denominado “espacio de configuración”, no fuera tan intuitivo como el espacio de tres dimensiones. En cambio, el modelo ondulatorio de de Broglie en este sentido era más *anschaulich*, porque utilizaba el espacio habitual.

Y hemos encontrado reiteradamente el término *anschaulich* en el artículo de 1927 en el que Heisenberg derivaba sus relaciones de indeterminación. En este trabajo su autor pretendía eliminar el estigma de *anschaulich* de su mecánica de matrices y propuso modificar el significado original de la noción de *Anschaulichkeit*. Por esta razón, Heisenberg redefinió el término y le dió un sentido positivista, es decir, en lugar de pictórico, visual e intuitivo, lo utilizó como consistente con el sistema formal y predecible empíricamente. Y calificó de *anschaulich* las relaciones de indeterminación que había derivado del formalismo cuántico.

También encontramos que Renniger valora el requerimiento de *Anschaulichkeit* en los modelos científicos. Así, en su trabajo de 1953, defiende el valor intelectual de la visualización, que manifiesta que el científico ha de buscar hasta donde sea posible y no se ha de poner límites prefijados, e intenta mostrar un desarrollo visual del modelo de onda guía de de Broglie.

Respecto a la tercera noción característica, la acausalidad, ya hemos visto que todos los autores estudiados hicieron su aportación. Así, Bohr y Heisenberg negaron la aplicabilidad de la causalidad en el dominio cuántico, basándose en la perturbación generada por el proceso de observación en el objeto. Einstein defendió la causalidad como un supuesto necesario de la ciencia. Schrödinger realizó manifestaciones en los dos sentidos y Renniger utilizó la relación de causalidad en la

interpretación de su experimento de 1953.

3. EL SURGIMIENTO Y LA ACEPTACIÓN DE LA ACAUSALIDAD

Según Forman, fue fundamentalmente la presión externa⁹⁰⁸ del ambiente cultural de la sociedad germanoparlante el factor que precipitó el surgimiento y la aceptación de la acausalidad en la mecánica cuántica. Justifica esta tesis⁹⁰⁹ con los siguientes argumentos. Después de la derrota de Alemania en la Primera Guerra Mundial predominaba en este país una atmósfera de depresión y desencanto, una conciencia generalizada de crisis, tanto económica y política como moral e intelectual, que afectaba también a la ciencia. Implícita en la *Krise der Wissenschaft* subyacía una valoración negativa de las ciencias exactas y naturales, quizás porque físicos, químicos y matemáticos, más que cualquier otro conjunto del mundo académico, había participado en la preparación de las operaciones militares alemanas. Con la derrota, estos científicos vieron que el prestigio de sus disciplinas era drásticamente menoscabado, puesto que una parte considerable de la población culta creía que las ciencias, con sus principios racionalistas y deterministas, habían contribuido a llevar a toda la sociedad al desastre. Así, en 1926 el filósofo de la ciencia H. Dingle pregonaba esta crisis con las siguientes palabras:

La situación en la que ya nada es nunca más realmente cierto, todo es posible y al mismo tiempo se mantiene también cada situación posible, en la que ya no existe ninguna base ni ninguna pauta, es decir, nada, nada que se pueda considerar cierto –en una palabra, el caos, el colapso⁹¹⁰. En esta situación nos encontramos⁹¹¹

Tras haber perdido la fe en el poder de la ciencia que la sociedad mantuvo antes de la guerra, después de ésta volcó sus esperanzas en la *Lebensphilosophie*, la filosofía de la vida, una filosofía antirracionalista y existencialista que privilegiaba la vida, el arte y la fantasía, en contraposición al materialismo mecanicista que se veía como propio de la ciencia. Así pues, se consideraba que el

908 Tema tratado también en p. 23 del apartado dedicado a Heisenberg en este trabajo

909 Forman había trabajado en el proyecto de documentar las fuentes primarias indispensables para la reconstrucción de la historia de la mecánica cuántica. El informe final de este proyecto del que Forman fue editor y archivero es *Sources for History of Quantum Physics*. De este trabajo Forman extrajo las conclusiones que constituyen sus tesis.

910 Resulta significativo que el término “colapso”, sinónimo de desmayo, síncope y paralización, sea el término que también designa la reducción del vector de estado que provoca la observación de un objeto, es decir, el cambio brusco e inexplicable de dicho vector a uno solo de sus componentes, el que observamos. La observación se considera como un salto instantáneo y aleatorio desde la superposición inicial a un único vector propio. Se ve como un colapso, una paralización. Así, esta imagen constituye un vestigio de la atmósfera cultural de los años 20.

911 Citado por Forman en *Ibid* (p.66)

árido mecanicismo había de ser substituído por una filosofía más completa que también comprendiese la vida. En este ambiente cultural en el que predominaba la filosofía de la vida se rechazaba la razón como instrumento epistemológico para comprender la realidad, que era en esencia la vida, debido a su anterior vinculación con el mecanicismo. Así, se veía la razón, a la manera cartesiana, sólo en su función analizadora y se la consideraba incapaz de intuir la experiencia vital real, no disecada por la relación causal --que era contemplada como el objeto de la fría actividad científica. Se presuponía una noción de causalidad según la cual todo lo que ocurre en la naturaleza está sujeto a leyes que siempre se cumplen. M. Planck⁹¹², en 1922, advertía del peligro que representaba la que consideraba una actitud anticientífica: “En años recientes, y en una medida cada vez mayor, se ha desarrollado una hostilidad consciente al modo de pensamiento propio de la ciencia natural”⁹¹³

Esta atmósfera cultural general se percibe en el incremento de la popularidad de múltiples creencias místicas de diversa índole, como el espiritismo, el ocultismo, la teosofía y la astrología. Así, Planck en 1923 manifestaba que “es sorprendente cuanta gente, especialmente en círculos educados [...] cae bajo el influjo de estas nuevas religiones, cuyos diferentes matices van desde el más confuso de los misticismos a la mayor de las supersticiones”⁹¹⁴. Dichas actitudes místicas crecientes se volvían generalmente contra la ciencia y la razón como sus enemigos más peligrosos⁹¹⁵

Esta atmósfera general también se muestra en la gran difusión que recibió el libro “La Decadencia de Occidente” de O.Spengler, que fue ampliamente leído en círculos universitarios. Este libro recoge el clima intelectual del momento y defiende un relativismo cultural que se extiende a la física y a la matemática. En palabras de Spengler:

Cada cultura tiene sus propias posibilidades nuevas de auto-expresión que surgen, maduran, declinan y nunca vuelven. No existe *una* cultura, *una* pintura, *una* matemática, *una* física, sino muchas, cada una diferente de la otra y en su esencia más profunda, cada una limitada en duración y auto-contenida⁹¹⁶

El libro estaba escrito en un tono fatalista y relativista que mostraba el pesimismo y el escepticismo

912Que se mantuvo fiel al principio de causalidad

913Citado por Forman en *Ibid.* (p 64)

914 “ “ (p.65)

915Aunque la mística y la ciencia no necesariamente han de ser incompatibles, como hemos visto en el apartado dedicado al monismo de Schrödinger

916Citado por Forman, *Ibid.*(p.68)

que imperaba en la Alemania derrotada y, como muestra la cita anterior, una de las tesis que presentaba era que, ya que la ciencia de cada etapa histórica depende de la forma de entender la vida en la época, no existe ningún criterio que permita distinguir el conocimiento científico verdadero del falso. Según Spengler, en aquel momento la cultura científica occidental estaba en pleno declive y predecía que un nuevo misticismo sería el destino y la salvación de la ciencia. “La Decadencia de Occidente” ejerció una gran influencia porque, con un estilo deslumbrante, expresaba la forma más generalizada de pensar. Por esta razón, sus predicciones y valoraciones fueron aceptadas de forma masiva⁹¹⁷. En esta obra el principio de causalidad, que se consideraba propio de la mentalidad científica, se valoraba de la siguiente manera:

Me refiero a la oposición entre la idea de sino y el principio de causalidad, una oposición que, en su profunda necesidad de configuradora del mundo, no ha sido reconocida hasta ahora como tal [...] Sino es una palabra para una indescriptible certidumbre interna. Uno clarifica la esencia de lo causal mediante un sistema físico o epistemológico, mediante números, mediante análisis conceptuales [...] el uno nos exige desmembrar, el otro crear, y aquí yace la relación del sino con la vida y de la causalidad con la muerte.⁹¹⁸

Por consideraciones de este carácter, Forman ve en la influencia de Spengler el establecimiento de la identidad entre ciencia y causalidad que se extendió en los ambientes intelectuales germanoparlantes en su connotación más peyorativa. En sus propias palabras:

Tras la derrota de Alemania la tendencia intelectual dominante en el mundo académico de Weimar fue una filosofía de la vida neo-romántica existencialista, manifestada en crisis y caracterizada por un antagonismo hacia la racionalidad analítica en general y hacia las ciencias exactas y sus aplicaciones técnicas en particular. Implícita o explícitamente, el científico era la víctima propiciatoria de las incesantes exhortaciones a la renovación espiritual, mientras que el concepto –o la mera palabra-- causalidad simbolizaba todo lo que era odioso de la empresa científica⁹¹⁹

Y finalmente Forman concluye que esta valoración social fue decisiva en la renuncia al principio de causalidad que protagonizaron algunos de los creadores de la mecánica cuántica:

917Einstein también leyó “La Decadencia de Occidente” pero al comentar a Born las sensaciones que este libro le produjo declaró: “Algunas noches dejo gustosamente que me sugiera algo y a la mañana siguiente aquello mismo me hace reír”, M. y H. Born, “Ciencia y conciencia en la era atómica” Alianza Editorial (1977) (p. 129)

918Citado por Forman, *Ibid.* (p.70)

919Forman, *Ibid.* (p. 91)

...todo lleva ineludiblemente a la conclusión de que los problemas sustanciales de la física atómica solamente jugaron un papel secundario en la génesis de esta persuasión acausal, que el factor más importante fue la presión socio-intelectual ejercida sobre los físicos como miembros de la comunidad académica alemana⁹²⁰

Con estas palabras vemos que Forman se está refiriendo al abandono del determinismo en la interpretación estándar de la mecánica cuántica, en la interpretación de Copenhague, cuyo núcleo fue constituido por aportaciones de Bohr, Heisenberg y Born, que defendieron reiteradamente la renuncia a la causalidad. Según Forman, el abandono del principio de causalidad era más motivado por la influencia del entorno cultural por el desarrollo interno de la ciencia, es decir por los descubrimientos que se realizaron en física atómica (por ejemplo, la desintegración radiactiva) . Pero analicemos las tesis de Forman.

4. LAS TESIS DE FORMAN

Podemos sintetizar la aportación de Forman en las tres tesis siguientes:

1ª) El modo de pensar generalizado en el ambiente cultural de la República de Weimar era la *Lebensphilosophie*, la filosofía de la vida, que se caracterizaba por sus rasgos antirracionalistas, neorománticos y existencialistas y por su rechazo del materialismo y el mecanicismo propios de la física clásica.

2ª) Debido a la presión socio-intelectual, muchos físicos adaptaron su ideología científica a este ambiente cultural.

3ª) Por dicho proceso de adaptación, muchos científicos renunciaron, en el dominio atómico, al principio de causalidad que representaba la mecánica clásica, desprestigiada en la sociedad culta de la época.

Estas tesis, en especial la tercera, han recibido diversas objeciones. Así, Kraft y Kroes⁹²¹ mantienen

⁹²⁰Forman, *Ibid.* (p. 88)

⁹²¹Según J.M.Sánchez Ron en la introducción de la traducción de la obra de P.Forman *Cultura en Weimar, causalidad y teoría cuántica, 1918-1927* (p.30)

que Forman valora demasiado el papel que desempeñaron grupos y asociaciones integradas por personas sin la formación científica adecuada para entender las nuevas propuestas de la teoría cuántica y, en cambio, no tiene en cuenta las comunicaciones presentadas ante científicos profesionales. Y plantean una cuestión: ¿si las ciencias físicas estaban tan desprestigiadas, cómo se explica que recibieran la alta financiación que les permitió adquirir tan gran desarrollo en el período en cuestión?

Por otra parte, desde la perspectiva de nuestra exploración, que ha permitido un acercamiento a la obra de unos autores que han realizado significativas aportaciones a la interpretación de la mecánica cuántica, consideramos lo siguiente. Respecto a la tercera tesis, según la cual el abandono de la acausalidad fue debida a la presión social, pensamos que Forman detecta una coincidencia entre el clima intelectual de la República de Weimar y la amplia aceptación de la acausalidad en la interpretación de la naciente teoría cuántica pero no llega a probar que la segunda esté provocada por el primero. Hemos encontrado en los textos de los autores estudiados concepciones cercanas al modo de pensar de la *Lebensphilosophie*; pero ello no significa que la renuncia a la causalidad sea claramente determinada por la influencia del ambiente intelectual de la época, que no tenga ninguna otra justificación. Así, la noción de complementariedad en la que Bohr pretendía integrar la causalidad se adaptaba perfectamente al carácter de la *Lebensphilosophie*, porque se refería⁹²² también, más allá de la física, a los múltiples aspectos contrarios que aparecen en la naturaleza viva, en la vida psíquica y en la vida social⁹²³. Por otra parte, Bohr manifestaba que, por la inevitable interacción entre instrumento y objeto, la unidad entre el sujeto –que es quien maneja el instrumento-- y el objeto es indivisible y Schrödinger justificaba con su ontología monista que sujeto y objeto constituían, en el fondo, la misma realidad. Además, éste último declaraba⁹²⁴ que la ciencia no es capaz de responder a las cuestiones que más interesan al ser humano, como de dónde viene y adónde va, porque la ciencia, por su propia naturaleza, sólo puede comprender un mundo objetivado, en el que no cabe el sujeto.

Pero creemos que Forman no tiene suficientemente en cuenta el desarrollo interno de la física atómica⁹²⁵ para justificar la aceptación de la acausalidad. No tiene en cuenta que había nociones

922 Apartado 6.4 del capítulo dedicado a la concepción filosófica de Bohr

923 Y encontramos alusiones al misticismo en los textos de Bohr y muy especialmente en los de Schrödinger

924 Estas últimas concepciones de Bohr y Schrödinger aparecen en el apartado dedicado a la imagen del mundo que ofrece la ciencia natural del capítulo dedicado a Schrödinger

925 Aunque las condiciones de la sociedad en que viven influyen en los físicos como influyen en todas las personas, que son seres sociales por naturaleza, pensamos que la ciencia física está básicamente determinada por la naturaleza de las cosas; por ejemplo, podemos comprobar que resultados que obtuvieron físicos del pasado concuerdan con

teóricas fundamentales, como el postulado cuántico y las relaciones de indeterminación, y descubrimientos significativos, como la desintegración radiactiva –en la cual sólo se podían establecer correlaciones estadísticas⁹²⁶--, que podían explicar por qué físicos teóricos como Bohr y Heisenberg negaban la aplicabilidad de la causalidad a los procesos atómicos. Como hemos visto, el postulado cuántico, según el cual en una observación se da una interacción en la cual hay un intercambio finito e incontrolable de energía, y las relaciones de indeterminación, según las cuales en una medida de dos magnitudes conjugadas, como la posición y el momento de una partícula, hay siempre una inevitable imprecisión, llevaron a Bohr y a Heisenberg a pensar que al no poderse conocer con precisión el estado de un objeto tampoco se puede conocer el desarrollo causal de éste. Así pues, para Bohr y Heisenberg, había razones suficientes para impedir establecer una relación causal entre diferentes estados, es decir, para abandonar el principio de causalidad. Al menos así, como hemos visto, lo justificaban en sus textos⁹²⁷.

Por otra parte, la presión social del ambiente cultural no fue un factor tan determinante como argumenta Forman para abandonar la causalidad porque no todos los físicos teóricos germanoparlantes de la época renunciaron a ella. Así, no tuvo prestigio entre los físicos alemanes la hipótesis de Bohr, Kramers y Slater⁹²⁸, a pesar de que constituía una propuesta que renunciaba a la conexión causal y sólo ofrecía correlaciones estadísticas. Por otra parte, hemos visto que en la interpretación estándar de la mecánica cuántica se consideraba que la ecuación de onda de Schrödinger determina unívocamente y sin ambigüedad la evolución en el tiempo de un sistema cuántico⁹²⁹, es decir se interpretaba causalmente dicha ecuación. Y hemos visto también que Einstein consideraba⁹³⁰ que el físico había de continuar buscando explicaciones causales de los procesos cuánticos⁹³¹. Según Einstein, sus colegas se estaban apresurando a proclamar el fracaso de la causalidad sin haber intentado seriamente encontrar una solución causal a los problemas que

resultados obtenidos en la actualidad

926Así decía Heisenberg: “Consideremos un átomo de radio, que puede emitir una partícula alfa [...] El tiempo de emisión de la partícula alfa no puede ser predicho. Lo único que podemos decir es que, por término medio, la emisión tendrá lugar en unos dos mil años. Por consiguiente, cuando observamos una emisión no buscamos el acontecimiento anterior que debió precederla de acuerdo con determinada regla”. *Física y filosofía* (p.69)

927 Quizás Forman respondería a esta objeción que lo que nos manifiestan explícitamente estos autores es la argumentación de la que ellos son conscientes; pero que, en el fondo, a nivel inconsciente, sin ellos darse cuenta, abandonaron la causalidad por la presión social del ambiente cultural en el que vivían. Pero no podemos hacer afirmaciones sobre el inconsciente, porque no podemos tener conocimiento firme, fundamentado, de él.

928Ver el apartado 6.1.2 del capítulo dedicado al pensamiento de Bohr

929Ver el apartado del cambio del vector de estado en el capítulo titulado “Los experimentos mentales de Renninger”

930Ver los apartados sobre el realismo de Einstein en el capítulo dedicado al pensamiento filosófico de éste en este trabajo

931Así Einstein, en 1924, manifestaba que la gran tarea educacional de la ciencia “se encuentra en despertar y mantener vivo el esfuerzo de un conocimiento causal de la totalidad”

planteaba la nueva teoría. Así, en 1924 Einstein escribió a Born:

No se me ha de forzar a abandonar la causalidad estricta sin defenderla lo más firmemente que pueda. Encuentro una idea muy intolerable que un electrón expuesto a radiación deba escoger por su *propio libre albedrío* no sólo su momento de saltar sino también su dirección. En este caso más bien preferiría ser un zapatero o incluso un empleado de una sala de juegos que un físico⁹³²

Y en 1929 manifestaba:

Admiro las contribuciones de la joven generación de físicos que se agrupan bajo el nombre de 'mecánica cuántica' y creo en el profundo contenido de verdad de esta teoría; sólo creo que la restricción a leyes estadísticas será únicamente temporal ⁹³³

puesto que

la evolución del mundo parece estar tan ampliamente determinada que no sólo el desarrollo temporal sino incluso también el estado inicial está ampliamente restringido por la ley⁹³⁴

Asimismo Planck también defendía el principio de causalidad y aludiendo a físicos eminentes como Exner⁹³⁵ y Bohr que pretendían conceder a los principios de su teoría un carácter fundamentalmente estadístico, argumentaba que “la suposición de la causalidad sin excepción, de un determinismo completo, constituye la presuposición para el conocimiento científico”⁹³⁶

Así, Planck aceptaba absolutamente el principio de causalidad y justificaba así su convicción:

el concepto de causalidad es algo fundamental, un concepto que en el fondo es independiente de los sentidos humanos y de la inteligencia humana y que con sus raíces más profundas abarca el mundo real, inaccesible a cualquier prueba científica directa. Nadie pondría en duda que si un día nuestro planeta, con todos sus habitantes, fuese aniquilado, los fenómenos cósmicos continuarían obedeciendo como

932Citado por J.Earman en *A primer on Determinism*. D.Reidel Publishing Company. Dordrecht (1986)

933Citado por P. Forman, *Ibid.* (p.134)

934Citado por P. Forman, *Ibid.* (p.135)

935Ver el apartado sobre la herencia de Boltzmann y Exner en el capítulo dedicado a Schrödinger

936P.Forman , *Ibid.* (p.106)

antes sus correspondientes leyes causales, aunque no hubiera ninguna persona que pudiera comprobar el sentido y la razón de semejante afirmación.⁹³⁷

Como vemos, Planck creía en la existencia de un mundo físico objetivo, un mundo situado tras el mundo de las sensaciones, que no es accesible directamente, pero cuya existencia está avalada por nuestra experiencia en la vida diaria y en la investigación científica. Planck estaba convencido también de que era posible que el hombre, con su intelecto, conociera el mundo real. Insistía, además, en que

...el hecho evidente de que seamos capaces, al menos hasta un cierto grado, de someter a nuestro proceso de pensamiento acontecimientos naturales futuros y acomodarlos a nuestra voluntad, sería un misterio totalmente incomprensible si no se nos permitiese, al menos, conjeturar una cierta armonía entre el mundo externo y el mundo humano⁹³⁸

Es decir, según Planck, cuando el científico realizaba un experimento⁹³⁹ en que verificaba su hipótesis estaba ofreciendo una prueba, según Planck, de las tesis realistas.

Y, ante la creciente ola de sentimiento anticausal que veía a su alrededor, Planck reprochaba a sus colegas que, al rechazar la causalidad, estaban traicionando su profesión y alimentando la mentalidad anticientífica que reinaba en los círculos cultos de su país.

Wien, como Planck y Einstein, también negaba que la teoría cuántica condujera necesariamente al abandono de la causalidad. El hecho de que los descubrimientos en física atómica obligasen a utilizar la estadística no implicaba la necesidad de renunciar a la causalidad, puesto que “la noción de que la naturaleza es comprensible es idéntica a la convicción de que todos los procesos naturales pueden reducirse a la causalidad, a leyes naturales invariablemente válidas”⁹⁴⁰. Sin embargo, la gran complejidad de las interconexiones causales impide que el principio de causalidad pueda percibirse siempre y en todas partes.

Incluso había intelectuales que pensaban que si se abandonaba el principio de causalidad la ciencia

937M. Planck, *El coneixement del món físic*, Edicions 62, Barcelona (1984) (p.268)

938Citado por Serelli, *El debate de la teoría cuántica*, Alianza Editorial, Madrid (1986) (p.21)

939Como los que veremos que diseña Renninger

940Citado por Forman (p.141)

no era posible. Así, el filósofo Gatterer, en 1924, refiriéndose a físicos que, como Exner, habían renunciado a dicho principio, se preguntaba: “¿Cómo puede uno abordar esta investigación con esperanza de éxito y dedicarse activamente a ella si secretamente alimenta la convicción de que los procesos elementales tienen lugar, al menos en parte, al azar, sin obedecer ley alguna?”⁹⁴¹. Subyace a esta pregunta retórica el supuesto que hemos visto que también asumía Einstein: aunque no se pueda llegar a verificar si la relación de causalidad se da en la naturaleza, es más fructífera, más beneficiosa, más viable para el progreso de la ciencia una teoría física causal que una teoría física acausal⁹⁴².

Reichenbach aún iba más allá, puesto que mantenía que abandonar el principio de causalidad implicaba renunciar a toda posibilidad de conocimiento. Negar la relación causa-efecto significaba negar que la naturaleza es comprensible. La esencia del conocimiento es la relación de causalidad, puesto que creemos que conocemos un fenómeno cuando establecemos relaciones de causa y efecto a partir de él, es decir, cuando identificamos unos fenómenos a partir de los cuales se produce y unos fenómenos a los que da lugar. Así, en 1922, escribió: “Si existe cognición de la naturaleza entonces el principio de causalidad es válido; pero, sin este principio, la cognición es, por su misma definición, imposible”⁹⁴³. Por esta razón, las predicciones puramente estadísticas no constituyen auténtico conocimiento.

5.CONCLUSIÓN DEL CAPÍTULO

En conclusión, ante la tesis de Forman según la cual el ambiente cultural de la república de Weimar llevó al abandono de la causalidad en la interpretación de la mecánica cuántica, estamos de acuerdo con una versión débil⁹⁴⁴ de dicha tesis, según la cual dicho ambiente ejerció una influencia; pero no podemos aceptar la versión fuerte de la tesis según la cual ejerció el mayor rol causal. O sea, podemos decir que el ambiente fue un condicionante, pero no un determinante.

Las razones de nuestra posición son las siguientes:

941Citado por Forman (p.105)

942Pero, con el paso del tiempo, podemos objetar a Einstein que posteriores generaciones de científicos han hecho ciencia con gran éxito renunciando al principio de causalidad

943Citado por Forman, *Ibid.*, (p. 104)

944Como califica Cushing en *Quantum Mechanics*, *Ibid.* (p.100)

En primer lugar, hemos encontrado en los textos de los defensores de la acausalidad, como Bohr y Heisenberg, reiteradas justificaciones basadas en el desarrollo interno de la teoría cuántica.

En segundo lugar, hemos encontrado incluso que un defensor de la acausalidad como Heisenberg admite una “causalidad restringida”⁹⁴⁵ en determinadas situaciones.

En tercer lugar, hemos encontrado diversos autores que mantuvieron la relación de causalidad; así hemos visto que Planck y Einstein la defendieron como principio insustituible de la ciencia y Renninger la utilizó de manera significativa en su trabajo de 1953.

⁹⁴⁵Ver el apartado sobre la relación de causalidad del capítulo dedicado al pensamiento de Heisenberg

SEGUNDA PARTE

Los experimentos de Renninger

CAPÍTULO 6. Los artículos de Renninger de 1953 y 1960

ÍNDICE DEL CAPÍTULO

1	Introducción del capítulo.....	318
2	La teoría de la medida.....	319
2.1	La medida en la física clásica y en la física cuántica.....	319
2.2	La teoría de la medida de von Neumann.....	320
2.2.1	El cambio del vector de estado.....	320
2.2.2	La interacción entre el objeto y el dispositivo.....	323
2.3	La elaboración de London y Bauer.....	325
2.4	La propuesta de Wigner.....	327
2.5	La aportación de von Weizsäcker.....	328
2.6	El modelo de Daneri, Loinger y Prosperi.....	329
3	M. Renninger. Notas biográficas.....	333
4	”Sobre la dualidad onda-partícula”, el artículo de Renninger (1953).....	334
4.1	Introducción: relación con Einstein.....	334
4.2	Objetivo del artículo.....	336
4.3	Contexto del artículo.....	339
4.3.1	El legado de Einstein.....	339
4.3.2	Frente a Bohr, Jordan y Heisenberg.....	341
4.4	El experimento.....	345
4.4.1	Cálculo de probabilidades.....	347
4.4.2	Las tres proposiciones que Renninger pretendía probar.....	348
4.4.3	La onda de Renninger.....	350
5	”Medidas libres de interacción”, el artículo de Renninger (1960).....	353

5.1	Marco conceptual.....	354
5.1.1	Frente a Bohr, Jordan y Heisenberg.....	354
5.1.2	El principio de neguentropía de Brillouin.....	356
5.2	El experimento.....	359
5.3	La respuesta de Heisenberg.....	362
5.4	El punto de vista de de Broglie.....	364
5.4.1	Crítica general de de Broglie a la interpretación dominante.....	364
5.4.2	Cuando la partícula no es siempre observable.....	367
5.4.3	Sobre el experimento de Renninger (1960).....	368
6	El experimento de Epstein, precedente de los experimentos de Renninger.....	370
6.1	El problema de la realidad.....	371
6.2	El experimento mental de Epstein.....	373
6.3	Relación entre el artículo de Epstein y los de Renninger.....	382
7	Posibles interpretaciones de los experimentos de Renninger.....	384
7.1	¿Cómo interpretaría Bohr los experimentos de Renninger?.....	384
7.2	¿Cómo interpretaría Einstein los experimentos de Renninger?.....	391
7.3	¿Cómo interpretaría Heisenberg los experimentos de Renninger?.....	397
7.4	¿Cómo interpretaría Schrödinger los experimentos de Renninger?.....	403
8	Desarrollos posteriores.....	406
8.1	El experimento de Elitzur y Vaidman.....	406
8.2	La versión de Penrose.....	412
8.3	Los experimentos de Herzog, Kwiat, Weinfurter y Zeilinger.....	416
8.3.1	El efecto Zenón cuántico.....	416
8.3.2	Aplicación a la polarización de la luz.....	419
9	Conclusión del capítulo.....	421

1. INTRODUCCIÓN DEL CAPÍTULO

En la segunda parte de este trabajo vamos a acercarnos a las IFMs bajo el punto de vista de la teoría de la medida, puesto que, al ser medidas sin perturbación del objeto, su justificación constituye un desafío dentro de la interpretación cuántica de la medida, ya que, la esencia de esta interpretación es la perturbación que sufre el objeto por el proceso de medida, debido a que dicha perturbación, por el orden de magnitud de las cantidades consideradas en el dominio cuántico, nunca es despreciable. Y esta perturbación, según mantienen Bohr⁹⁴⁶ y Heisenberg⁹⁴⁷, tiene consecuencias trascendentales para la interpretación de toda la mecánica cuántica, puesto que lleva a renunciar a principios fundamentales de la física clásica, como la objetividad y la causalidad.

Por otra parte, la teoría cuántica de la medida presenta problemas; uno de ellos es la inconsistencia que aparece entre sus postulados, puesto que, según su formulación standard inspirada en von Neumann⁹⁴⁸, el vector de estado de un sistema va evolucionando continuamente de acuerdo a una dinámica determinista, que es regida por la ley de Schrödinger y, cuando se efectúa una medida, que es un proceso natural como otro cualquiera, entonces el sistema objeto de la medida colapsa, es decir, “salta” instantánea y aleatoriamente a uno solo de sus componentes, el que constituye el resultado de la medida. Otro problema es que la teoría cuántica no especifica exactamente cuándo, exactamente, ocurre el colapso, o sea, hasta cuándo se da la dinámica determinista y cuándo empieza la indeterminista.

En este capítulo veremos algunas aportaciones a la teoría de la medida, entre las que se encuentra la de Wigner y la de Daneri, Loinger y Prosperi. Y es en la crítica que Jauch, Wigner y Yanase presentan a la última propuesta donde encontramos referencias al experimento de medida sin perturbación de Renninger, que es presentado como objeción al modelo de aquéllos; así como también encontramos dicho experimento en la crítica que de Broglie hace de la interpretación dominante, en la línea de las objeciones presentadas a esta interpretación por Einstein y Schrödinger. Analizaremos los dos artículos de Renninger que contienen sus experimentos de IFM y, con ellos, otros trabajos anteriores que ayudan a entenderlos mejor. Y, finalmente, terminaremos acercándonos a desarrollos posteriores de IFMs, que han sido hechos realidad en el laboratorio y que, además, han conseguido un sorprendente incremento de su rendimiento inicial.

946N. Bohr, *El postulado cuántico...*(p.100)

947W.Heisenberg, *Física y filosofía* (p. 38)

948C.Cohen-Tannoudji, B.Diu, F.Laloe, *Quantum Mechanics*. New York:J.Willey &Sons (1977) (p.211)

2. LA TEORIA DE LA MEDIDA

2.1 LA MEDIDA EN LA FÍSICA CLÁSICA Y EN LA FÍSICA CUÁNTICA

La ciencia física estudia los fenómenos más generales de la Naturaleza a través de la experiencia. La forma en que la experiencia nos permite acercarnos a ellos para estudiarlos atentamente es la observación y el refinamiento cuantitativo de ésta, la medida. Por esta razón se ha afirmado ⁹⁴⁹que la física es la ciencia de la medida⁹⁵⁰. Sin embargo, antes de la teoría cuántica el concepto de medida no había suscitado especial interés. En física clásica se consideraba que la observación y la medida implicaban, por una parte, una interacción entre el objeto observado o medido (por ejemplo, un planeta) y el aparato de medida (por ejemplo, un telescopio) y, por otra parte, una interacción psicofísica entre el aparato y el observador (sus sentidos y su consciencia)⁹⁵¹. Pero en dichas interacciones no se veía problema alguno o si se lo veía se suponía que se podía ignorar, puesto que, aunque la medida implicaba tanto una acción del objeto sobre el aparato como una acción del aparato sobre el objeto, al ser el orden de magnitud de la segunda mucho más pequeño que el de la primera, se consideraba, en principio, que la segunda acción era desdeñable. Obviamente, la primera no se podía omitir porque la situación de los marcadores del aparato, para que sirviera como dispositivo de medida, había de depender del estado del objeto. Además, para “objetivar”⁹⁵² la física, el problema psicofísico de la relación entre el aparato y el observador se dejaba al margen, y se lo consideraba extraño a dicha ciencia natural.

Pero con el nacimiento de la mecánica cuántica se vió que, debido al valor de la constante de Planck h , la acción del objeto sobre el aparato y la acción del aparato sobre el objeto podían tener el mismo orden de magnitud. Por tanto, ya no se podían omitir los problemas que provocaban la observación y la medida. Desde un principio, las relaciones de indeterminación de Heisenberg⁹⁵³ ofrecieron una justificación teórica a dichos problemas. Pero aunque, en reiteradas ocasiones, Heisenberg estudió detalladamente la imprecisión de las medidas de la posición, del momento y de la energía, nunca desarrolló una teoría general de la medida. Se limitó a interpretar la observación y la medida como una reducción de la función de onda en la que se realiza la transición del ser en

949Según Norman Campbell, citado por Jammer en *The Philosophy of Quantum Mechanics*, *Ibid.* (p. 471)

950Por ello EPR manifiestan que “esta experiencia, que por sí sola nos permite realizar inferencias sobre la realidad, en física toma la forma del experimento y la medida” (p.138)

951M.Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, *Ibid* (p.471)

952Ver el apartado de “La imagen del mundo que ofrece la ciencia natural” del capítulo sobre Schrödinger

953 Como en las conferencias de Chicago, según M.Jammer.

potencia al ser en acto de Aristóteles.

Por otra parte, Bohr analizó con gran detalle experimental diversos procedimientos de medida – como se muestra en el debate que mantuvo con Einstein– y reflexionó sobre la distinción que establece la física clásica entre el objeto observado y el sujeto que observa. Llegó a la conclusión de que no se puede mantener dicha distinción puesto que, en el fondo, hay una unidad entre objeto y sujeto, debida al hecho de que no se puede trazar de manera precisa una línea divisoria entre ellos, porque los procesos de observación y de medida inevitablemente provocan una perturbación incontrolable en el objeto. Pero el acercamiento de Bohr al problema de la medida fue sólo heurístico. Además, no intentó realizar un tratamiento formal del problema, puesto que pensaba que para que una elaboración formal tuviera significado físico era necesario que se la interpretara en términos de conceptos clásicos y éstos, que al final representan los últimos datos de la experiencia común, en última instancia no son formalizables.

Por esta razón⁹⁵⁴, Bohr tampoco mostró nunca auténtico interés en una formulación axiomática de la mecánica cuántica. La axiomatización no puede evitar conceptos primitivos no definidos cuyo significado sólo puede expresarse en términos del lenguaje de la experiencia cotidiana. Y, como la axiomatización de la mecánica cuántica se realizaría con el objetivo de clarificar esta última, resulta que al final sería circular. Así, según Bohr, la axiomatización no resolvería los auténticos problemas y tan sólo serviría para probar la consistencia de la argumentación.

2.2 LA TEORÍA DE LA MEDIDA DE VON NEUMANN

2.2.1. El cambio del vector de estado

Quien elaboró una axiomatización de los fundamentos de la mecánica cuántica “en el mejor espíritu de la ortodoxia matemática” fue von Neumann⁹⁵⁵; dicha axiomatización contenía una teoría de la

⁹⁵⁴Según M.Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, (p.472)

⁹⁵⁵Su obra *Los fundamentos matemáticos de la Mecánica Cuántica* es “una obra clásica de la literatura científica en la que, entre otros resultados importantes, se axiomatiza la mecánica cuántica en el mejor espíritu de la ortodoxia matemática”, según José Manuel Sánchez Ron en la introducción de la edición española. En ella von Neumann justifica de forma rigurosa los conceptos y métodos que Heisenberg, Jordan y Born habían utilizado. Uno de los temas más destacados que estudia von Neumann es el de las variables ocultas, tema ya iniciado por Born en 1926 en el artículo en que introdujo su interpretación estadística de la función de ondas, en el que señalaba que “cualquiera que no esté satisfecho con estas ideas [la interpretación estadística] puede sentirse libre para suponer que existen parámetros adicionales, todavía no introducidos en la teoría, que determinan el suceso individual”. Von Neumann

medida, que, aunque estaba parcialmente inspirada en las ideas de Bohr⁹⁵⁶ y Heisenberg⁹⁵⁷, las trascendía en muchos puntos. Las tesis principales de la teoría de la medida de von Neumann son las siguientes:

Los posibles estados de un sistema pueden caracterizarse completamente con vectores de estado⁹⁵⁸, que se representan como combinaciones lineales de unos términos que son los vectores propios, es decir, como superposiciones de estados del sistema. Los vectores de estado de un sistema pueden cambiar de dos maneras. Así, por una parte, como resultado del paso del tiempo, evolucionan de forma continua, causal y termodinámicamente reversible, siguiendo la ecuación de Schrödinger dependiente del tiempo. Pero, por otra parte, cuando se realiza una medida, entonces el sistema cambia instantáneamente, de forma discontinua, a un solo término, a un único vector propio de la combinación lineal, es decir, a un único estado del sistema, que es el resultado que se observa. Este segundo tipo de cambio se denomina “colapso” o “reducción del vector de estado”, puesto que el vector de estado inicial del sistema se reduce bruscamente a un solo vector. Este último cambio, que no es termodinámicamente reversible, sigue las leyes de la probabilidad, basándose en la regla de Born, según la cual la probabilidad de cada resultado de la medida es dada por el cuadrado de la amplitud del término correspondiente en la superposición del vector de estado inicial.

Así pues, según von Neumann, los sucesos que tienen lugar en la parte observada del mundo, en tanto no está en interacción con la parte que observa, se describen por medio del proceso continuo y causal que obedece la ecuación de Schrödinger; pero cuando hay una interacción⁹⁵⁹, por ejemplo,

abordó el problema planteado por Born y estudió si la teoría estadística de la mecánica cuántica tal como se había establecido podía ser reformulada como una teoría enteramente determinista con la introducción de variables ocultas, es decir, con variables adicionales que, no como los observables ordinarios, eran inaccesibles a las medidas y, por tanto, no estaban sujetas a las restricciones de las relaciones de indeterminación de Heisenberg. Von Neumann llegó a la conclusión, que probó como teorema, de que había de descartar la explicación que recurre a variables ocultas, “una tal explicación es incompatible con ciertos postulados fundamentales de la mecánica cuántica”, manifestaba el autor en la introducción y, más adelante, declaraba que “[la nueva mecánica] debiera ser esencialmente falsa para que fuese posible un comportamiento en los procesos elementales distinto del estadístico”.

Según J.M. Sánchez Ron, una parte importante de los resultados contenidos en la obra de von Neumann pasó a formar parte de la filosofía de la escuela de Copenhague; en particular, el postulado de que es imposible restaurar en la mecánica cuántica la causalidad mediante variables ocultas favoreció los argumentos de la escuela de Copenhague de que no es posible evitar el principio de incertidumbre y el de complementariedad. J. von Neumann, *Fundamentos matemáticos de la mecánica cuántica*. Madrid: CSIC, 1991

956 Según el cual, toda medida implica una interacción entre aparato y objeto

957 Según el cual, toda medida comporta imprecisión

958 El concepto de vector de estado desempeña una función esencial en la formulación de la mecánica cuántica y, en particular, en la teoría de la medida. Como manifiesta Wigner: “Ya que toda la información se obtiene en la forma de los resultados de las medidas sobre el sistema, la manera estándar de obtener el vector de estado es también realizar medidas sobre el sistema”. Wigner, *The problem of measurement, Quantum Theory and Measurement*, Edit: Wheeler y Zurek. Princeton University Press. Princeton (1983), (p. 335)

959 Von Neumann escribe “existe una tal interacción, es decir, una medición”, J. von Neumann, *Ibid.* (p.299) pero

una medición, entonces es necesario describirla con el proceso discontinuo y probabilístico del colapso.

Pero el mismo von Neumann, mostrando una evidente sensibilidad física⁹⁶⁰, reconocía que no estaba claro cómo se producía el colapso, el cambio drástico que se da cuando hay una observación o una medida: "Cierto es que el 'cómo' queda sin aclarar: ese tránsito discontinuo a modo de salto desde Φ hasta uno de los estados Φ_1, Φ_2, \dots , ¡con seguridad es de una muy otra índole que el descrito por la ecuación temporal de Schrödinger! Ésta da lugar siempre a un cambio continuo de Φ , cuyo resultado final está unívocamente determinado y depende de Φ "⁹⁶¹.

Esta inseguridad, que algunos autores ven como una inconsistencia, para explicar el cambio discontinuo que se da cuando se efectúa una medida, hizo que la reducción del vector de estado, es decir, el colapso, no fuera aceptada por muchos físicos y constituyó el problema de la medida. Así muchos han considerado que el postulado de reducción es incompatible con el resto de la mecánica cuántica y, en palabras de Gottfried, el colapso constituye "una repugnante cicatriz en la que, si se la pudiera quitar, sería una hermosa teoría"⁹⁶².

Para evitar el problema de la medida, posteriormente Everett⁹⁶³ eliminó el postulado del colapso. Así, según Everett, como no hay reducción, todos los estados de la superposición se conservan después de la medida. El problema de la medida significa un reto intelectual tan acuciante que la propuesta de Everett ha tenido multitud de seguidores. Pero dicha propuesta presenta un grave problema: cómo reconciliar la realización de todos los posibles resultados de una medida con nuestra experiencia cotidiana en la que percibimos uno solo de los resultados posibles⁹⁶⁴. Intentando resolver este problema los seguidores de Everett han dado diferentes interpretaciones a su tesis.

podemos pensar en la existencia de interacciones que no sean lo que habitualmente se considera "mediciones", por ejemplo, poner en marcha un dispositivo a través de un interruptor.

960 J.M. Sánchez Ron, Introducción de *Fundamentos matemáticos de la Mecánica Cuántica*, (p.38)

961 J.M. Sánchez Ron, Introducción de *Fundamentos matemáticos de la Mecánica Cuántica*, (p.38)

962 K. Gottfried, Does Quantum Mechanics Carry the Seeds of its own Destruction?, *Quantum Reflections*, Amati, D. et al. (eds). Cambridge University Press. Cambridge (2000)

963 Everett III, H. "Relative state" Formulation of Quantum Mechanics, originalmente publicado en *Reviews of Modern Physics*, 29, 454-62 (1957). También está en *Quantum Theory and Measurement* editado por Wheeler y Zurek, *Ibid.* (p.315)

964 Vaidman, que defiende la interpretación de los muchos mundos, mantiene que, aunque no se puede esperar "ver" cómo nuestro mundo "se divide", sí es posible probar la existencia de muchos "mundos" en un neutrón que pasa a través de un interferómetro. Además Vaidman manifiesta que la teoría de los múltiples mundos le ha sido muy productiva para explicar los experimentos de medidas sin interacción que ha realizado con Elitzur y que veremos más adelante. L. Vaidman, On Schizophrenic Experiences of the Neutron or Why we should believe in the Many-Worlds Interpretation of Quantum Theory, arXiv:quant-ph/9609006v1 7 Sep 1996

Para unos, los distintos estados describen *mundos* distintos; para otros describen *historias* distintas; para otros, *mentes* distintas.

2.2.2 La interacción entre el objeto y el aparato

Von Neumann considera⁹⁶⁵ que la medida, en esencia, consiste en una interacción que establece una relación estadística entre los estados del objeto y los estados del dispositivo que mide. Así pues, el observador no dirige su atención directamente al objeto que pretende conocer sino al dispositivo e infiere el estado de éste a partir de la observación del estado de aquél.

Pero, si bien Heisenberg y Bohr trataban el dispositivo de medida como un objeto macroscópico sujeto a las leyes de la física clásica⁹⁶⁶, von Neumann consideraba, por consistencia, que este dispositivo debía obedecer también las leyes cuánticas⁹⁶⁷. Por consiguiente, para observar este dispositivo se necesitaría otro segundo dispositivo y para observar el segundo se necesitaría un tercero y así sucesivamente; por tanto, esta propuesta llevaría a una regresión infinita. Pero una medida ha de ser una operación finita. En consecuencia, el proceso que lleva a la medida ha de ser un acto instantáneo, discontinuo, no causal, del segundo tipo de los citados anteriormente. ¿Dónde tiene lugar este acto? En la conciencia del observador, responde von Neumann. Una medida completa implica siempre la existencia de la conciencia de un observador.

Así, el acto de la medida y la toma de conciencia, es decir, el proceso de apercepción subjetiva con él ligado, nos llevan a la vida intelectual interior del individuo, que la ciencia natural intenta describir como si tuviera lugar en el mundo físico. Como ilustración, von Neumann presenta el siguiente ejemplo:

Supongamos que se trata de medir una temperatura. Si se quiere, podemos perseguir el proceso por medio del cálculo hasta tener la temperatura del entorno del depósito de mercurio y decir entonces: esta temperatura es medida por el termómetro. Pero podemos también llevar los cálculos más allá y calcular

965Según M.Jammer en *The Philosophy of Quantum Mechanics*, *Ibid.* (p.475)

966Ver de Heisenberg *The Physical Principles of the Quantum Theory*, capítulo 2, y de Bohr *El postulado cuántico y el reciente desarrollo de la teoría atómica*, sección 3

967Mas, según Stapp, describir el sistema compuesto de objeto más dispositivo de medida en términos de la función de onda de la mecánica cuántica, como sugería von Neumann, no se ha llevado a la práctica. Una de las razones a que ello es debido es la complicación de los dispositivos macroscópicos de medida. H.P.Stapp, *The Copenhagen Interpretation*, *American Journal of Physics*, 40, 1972 (p.1098), disponible en <http://dx.doi.org/10.1119/1.1986768>

el calentamiento, dilatación y longitud de la columna a partir de las propiedades de éste que se explican por la teoría cinético-molecular y entonces decir: esta longitud es vista por el observador. Siguiendo todavía más adelante, podríamos tomar en consideración el foco luminoso, la reflexión de los quanta de luz en la columna de mercurio opaca y determinar la trayectoria de los que penetran en los ojos del observador, su refracción en el cristalino y la formación de una imagen en la retina; sólo entonces cabría decir: esta imagen es registrada por la retina del observador. Y si nuestros conocimientos fisiológicos fuesen más exactos de lo que hoy son, podríamos ir aún más allá, seguir las reacciones químicas que esta imagen provoca en la retina, en los nervios y en el cerebro y sólo al final pudiérase decir: el observador percibe estos cambios químicos en las células de su cerebro. Pero por lejos que llevemos los cálculos, hasta el depósito de mercurio, hasta la escala del termómetro, hasta la retina o hasta el cerebro, llega un momento en que hay que decir: y esto es percibido por el observador. Con otras palabras, siempre hemos de dividir el Universo en dos partes: una es el sistema observado, la otra el observador. En la primera podemos seguir todos los procesos físicos con tanta precisión como queramos (por lo menos en principio), en la última esto carece de sentido. El límite entre ambas es ampliamente arbitrario [...] en particular, el observador no tiene por qué ser identificado, en este sentido, con el cuerpo del observador real –en el ejemplo que precede, una vez involucrábamos en él incluso el termómetro, mientras en otra no incluíamos en el observador ni sus ojos ni su sistema nervioso. [...] el límite en cuestión puede hacerse retroceder cuanto se quiera en el interior del cuerpo del observador real [...] Sin embargo, esto nada quita a que sea necesario fijarlo en algún sitio para cada modalidad de descripción, si ésta no ha de discurrir en el vacío, es decir, si ha de ser posible una comparación con la experiencia. Y ello es así, porque ésta conduce a enunciados del siguiente tipo: un observador ha llevado a cabo un determinado acto de percepción (subjetiva). Nunca conduce a enunciados de este tenor: una magnitud física tiene un determinado valor⁹⁶⁸.

Los últimos enunciados de esta cita muestran que von Neumann, al estudiar la medida, mantenía la influencia del positivismo de Heisenberg, pues recuerdan la siguiente manifestación de éste :

las leyes de la naturaleza que formulamos matemáticamente en teoría cuántica no tratan con las partículas elementales en sí mismas sino con nuestro conocimiento de las partículas elementales⁹⁶⁹.

Por otra parte, para entender lo que ocurre cuando realizamos una medida, von Neumann ofrece el esquema siguiente. Consideremos que I es el sistema que queremos medir y II es el dispositivo de medida. Pero para realizar una medida en el sistema II es necesario otro dispositivo III. Así el sistema I+II está, con respecto a III, en la misma situación que I estaba con respecto a II. Por tanto,

968 J.von Neumann, *Fundamentos matemáticos de la Mecánica Cuántica*, CSIC, Madrid (1991) (p.299)

969W.Heisenberg, The representation of nature in contemporary physics, *Daedalus* 87(3), 99 (1958)

o bien puede verse I como objeto y II+III como dispositivo o bien I+II como objeto y III como dispositivo. Según von Neumann, sólo tiene sentido una aseveración sobre II cuando corresponde a una observación realizada por medio de III y una aseveración sobre III sólo tiene sentido cuando se realiza otra observación mediante otro sistema IV y así sucesivamente.

Como hemos visto, en esta cadena de instrumentos de medida von Neumann incluía, junto al dispositivo en sentido estricto, también los órganos de los sentidos con los cuales el sujeto observa el aparato, el sistema nervioso que envía al cerebro los datos de los sentidos y así sucesivamente. Así, para von Neumann, el punto en que se hace la separación entre el sistema observado y el sujeto observador –el *Schnitt*, el corte, de Heisenberg-- no importa, puesto que podemos establecer el límite entre el sistema y el aparato o entre el aparato y los órganos de los sentidos o entre los órganos de los sentidos y el sistema nervioso, y así sucesivamente. Al final quien realiza la observación es el yo abstracto que se hace consciente del resultado. Así pues, von Neumann llega a la conclusión de que las leyes de la mecánica cuántica no se pueden formular de manera completa y consistente sin referirse a la conciencia humana.

2.3 LA ELABORACIÓN DE LONDON Y BAUER

Mas la teoría de la medida de von Neumann, que constituye la culminación⁹⁷⁰ de su presentación axiomática de los fundamentos de la mecánica cuántica, no era fácilmente accesible, puesto que requería un alto nivel de conocimientos matemáticos. Por esta razón, F. London y E. Bauer decidieron escribir una presentación “concisa y simple”⁹⁷¹ de los problemas de principios que plantea el acto de la observación⁹⁷². Esta monografía resume el punto de vista ortodoxo⁹⁷³ basado en la obra de von Neumann. La sección dedicada a la medida fue escrita principalmente por

970Según M. Jammer en *The Philosophy of Quantum Mechanics*, *Ibid.* (p. 482)

971 F.W. London y E. Bauer, *The Theory of Observation in Quantum Mechanics* en *Quantum Theory and Measurement*, Princeton University Press (1983) Prefacio (p. 219)

972Problemas sobre los cuales la mecánica cuántica tiene mucho que decir a los que, sin ser físicos, quieren entender qué es el acto de observar en sí mismo.

973Según E.P. Wigner este punto de vista surgía del artículo de 1927 en el que Heisenberg formuló por vez primera la relación de indeterminación. Las consecuencias que implicaban las ideas de Heisenberg fueron inferidas en primer lugar por von Neumann en *Fundamentos matemáticos de la Mecánica Cuántica*, pero también las encontramos en otras obras como *Anschauliche Quantentheorie* de P. Jordan. Sin embargo, a muchos físicos les costaba aceptar las conclusiones del punto de vista ortodoxo en el problema de la medida. E.P. Wigner, “El problema de la medida”, en *Quantum Theory and Measurement*, editado por J.A. Wheeler y W.H. Zurek. Princeton University Press (1983) (p. 325)

F.London⁹⁷⁴, que durante toda su vida había estado profundamente interesado en filosofía⁹⁷⁵ y al tratar el problema cuántico de la medida mostraba influencias de la teoría psicológica de Lipps⁹⁷⁶ y de la filosofía interaccionalista de E. Becher⁹⁷⁷:

Un emparejamiento, incluso con un aparato de medida, no es aún una medida. Sólo se consigue una medida cuando la posición del marcador ha sido *observada*. Es precisamente este incremento de conocimiento, adquirido por observación, lo que da al observador el derecho a escoger entre los diferentes componentes de la mezcla predicha por la teoría para rechazar aquellos que no han sido observados y atribuir a partir de entonces al objeto una nueva función de onda, la del estado puro que ha sido encontrado.

Notamos el papel esencial jugado por la conciencia del observador en esta transición desde la mezcla al estado puro. Sin su intervención efectiva no se obtendría nunca una nueva función ψ [...]

Para él [el observador] es sólo el objeto x y el aparato y que pertenecen al mundo externo, a lo que él llama “objetividad”. Por contraste, él tiene *consigo mismo* relaciones de un carácter muy especial. Posee una facultad característica y completamente familiar que podemos llamar “facultad de introspección” [...]

Así no es una misteriosa interacción entre el aparato y el objeto lo que produce una nueva ψ para el sistema durante la medida. Es sólo la conciencia de un “Yo”⁹⁷⁸.

Así pues, London y Bauer desarrollaron las ideas de von Neumann de una manera más clara y accesible que éste e insistieron en el enunciado de que lo que produce la reducción de la función de

974F. W.London, que realizó significativas contribuciones en el campo de la física, como la teoría Heitler-London de covalencia y su trabajo en el efecto Meissner, estaba especialmente influido por la teoría psicológica de la empatía de T.Lipps y por la filosofía interaccionalista de E.Becher, quien mantenía que el problema de la interacción mente-cuerpo es la cuestión central de la metafísica.

975Según M.Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, (p.482)

976 para quien la empatía tiene dos componentes fundamentales, la “proyección” y la “imitación”; por medio de la proyección el sujeto “extiende” su propio ser a una realidad ajena a dicho sujeto y por medio de la “imitación” el sujeto se apropia de ciertas formas de tal realidad; por otra parte, Lipps aplica el concepto de empatía para comprender la experiencia estética, estado psíquico que para él es un “placer objetivado del yo”. *Diccionario de Filosofía*, J.Ferrater Mora, Barcelona: Alianza Editorial, (1981)(p.929).La noción de empatía de Lipp influyó en la perspectiva bajo la cual vió London el proceso de medida en mecánica cuántica, según M.Jammer.

977Quien declara que “los procesos psíquicos se extienden por el cerebro en un curso continuo y producen, además de efectos físicos, efectos psíquicos que a su vez afectan decisivamente a hechos físicos”, según M.Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, *Ibid.*(p.484)

978 F.London y E.Bauer, *The Theory of Observation in Quantum Mechanics* en *Quantum Theory and Measurement*, edit J.A. Wheeler y W.H.Zurek. Princeton University Press (1983) (p.252)

onda es la conciencia. Wigner desarrolló este enfoque con un mayor alcance filosófico.

2.4 LA PROPUESTA DE WIGNER

Wigner pretendía responder a la pregunta de cuál es el momento determinado en el que se produce la reducción de la función de onda. Su propuesta fue que el colapso se da en el instante en que el sujeto toma conciencia de su observación. Así la expone:

El punto importante es que la impresión que uno recibe en una interacción puede, y en general lo hace, modificar las probabilidades con las que uno recibe las varias impresiones posibles en interacciones posteriores. En otras palabras, la impresión que uno recibe en una interacción, llamada también *el resultado de una observación*, modifica la función de onda del sistema. La función de onda modificada es, además, en general impredecible antes de que la impresión recibida haya penetrado en nuestra conciencia: es la penetración de una impresión en nuestra conciencia lo que altera la función de onda porque modifica nuestra valoración de las probabilidades para diferentes impresiones que esperamos recibir en el futuro⁹⁷⁹.

Para argumentar su propuesta Wigner partía del esquema de la llamada “cadena de von Neumann”. Si pensamos que el objeto cuántico se encuentra en superposición de estados entrelazados con el dispositivo de medida y consideramos que el sistema objeto-dispositivo también está en superposición de estados, asimismo podemos considerar que el cerebro del observador se entrelaza con el sistema objeto-dispositivo de manera que también se da superposición de estados en el sistema total objeto-dispositivo-cerebro. Pero no podemos aceptar que la conciencia se encuentra en superposición de estados, puesto que en nuestra vida cotidiana no percibimos tal superposición sino que tan solo percibimos un único resultado en cada observación⁹⁸⁰.

Para ilustrar su argumentación, Wigner proponía sustituir el experimento del gato de Schrödinger⁹⁸¹ por otro experimento más inofensivo. En lugar de tener un gato encerrado en una caja, había un “amigo de Wigner” en el interior de una habitación y, en lugar de tener una dosis de cianhídrico que mataría el gato si el átomo radioactivo se desintegraba, había un dispositivo que enviaría una

979 E.P.Wigner, Remarks on the Mind-Body Question, en *Quantum Theory and Measurement*, Edit: Wheeler y Zurek , *Ibid.* (p.173)

980 Karim Gherab Martín, *De la Interpretación de Copenhague a la Inteligencia Artificial: los Físicos y el Problema de la Consciencia*, tesis doctoral, (p.149)

981 Ver apartado 3 del capítulo dedicado a Schrödinger de este trabajo

señal luminosa en caso de desintegración.

Wigner argumentaba que si su amigo veía la señal luminosa, hecho que mostraba que el átomo se había desintegrado, y se lo comunicaba al salir de la habitación, ello significaba que la función de onda había colapsado en el preciso instante en que su amigo había tomado conciencia del destello.

Pero la propuesta de Wigner nos plantea diversas cuestiones, entre las que se encuentran las dos siguientes:

¿Cómo actúa la conciencia sobre la materia para provocar el colapso de la función de onda?

Si, por diversos motivos, varios observadores toman conciencia del resultado de la observación en momentos diferentes, ¿hemos de pensar que el colapso también ha ocurrido en instantes diferentes? Responder afirmativamente a esta última pregunta incomodaría a muchos investigadores físicos y a la mayoría de personas, que asumen presupuestos realistas.

2.5 LA APORTACIÓN DE VON WEIZSÄCKER

C.F. von Weizsäcker basaba la inseparabilidad entre objeto observado y sujeto observador no sólo en el acto mental de la conciencia sino también en el de la volición. Así manifestaba: "Dos funciones fundamentales de la conciencia se encuentran en la base de cada enunciado de la física: cognición y volición"⁹⁸². Según von Weizsäcker la diferencia esencial entre mecánica cuántica y física clásica es que en la primera no se puede construir ningún enunciado sin referirse al estado subjetivo del observador, que incluye el conocimiento y la voluntad. Ello se sigue del hecho de que "la función ψ expresa la probabilidad de cada resultado posible de cada posible experimento" en que el primer "posible" se refiere al estado de ignorancia o conocimiento y el segundo "posible" se refiere a la decisión voluntaria de realizar un experimento o no realizarlo. Von Weizsäcker ilustraba esta situación con su análisis particular del experimento mental del microscopio de rayos γ : si el electrón tiene un momento exacto o una posición exacta depende de la decisión voluntaria del observador de cómo prepara el dispositivo de medida.

982C.F. von Weizsäcker, Zur Deutung der Quantenmechanik, *Zeitschrift für Physik* **118**, 489-509 (1941), M.Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, (p.485)

2.6 EL MODELO DE DANERI, LOINGER Y PROSPERI

Aunque era inobjetable desde el punto de vista puramente lógico, la teoría de la medida de von Neumann fue el objetivo de duras críticas; una de ellas fue lanzada por A. Daneri, A.Loinger y G.M. Proserpi⁹⁸³, quienes la acusaban de estar basada en una filosofía radicalmente subjetivista⁹⁸⁴.

Estos autores⁹⁸⁵ consideraban que había que seguirse el camino opuesto al que había seguido von Neumann, que le había llevado al subjetivismo, porque la física ha de ser objetiva y, por consiguiente, válida para todos los posibles observadores. Para que la física mantenga su universalidad y simplicidad hay que eliminar de ella todas las referencias a la vida, puesto que la vida pertenece a otro tipo de estructuras materiales mucho más complejas que las que estudia la física. La mecánica cuántica, como teoría física, ha de describir la naturaleza objetiva de los cambios inducidos por los microobjetos en las macropropiedades del aparato de medida en términos de dispositivos sujetos sólo a las leyes de la física y completamente analizables por medio de ellas. Y la referencia final de von Neumann a la conciencia del observador no aporta una explicación clara desde el punto de vista de la física, sino que más bien es como un “oscuro”⁹⁸⁶ retiro. Lo que importa a la física es el proceso automático de la medida en sí mismo, no el proceso biológico implicado en él ni el hecho de que un ser humano observe el resultado de la medida o no lo haga nadie. Sólo manteniendo la separación entre objeto observado y sujeto observador es posible mantener el carácter objetivo y universal de la descripción física. Incluir la conciencia del sujeto observador implicaría introducir un elemento subjetivo y particular en la descripción física que impediría que ésta fuera universal, condición esencial de la ciencia natural⁹⁸⁷. Los físicos a lo largo de la historia han realizado grandes esfuerzos para mantener al sujeto fuera de la imagen que han ofrecido de la naturaleza y estos esfuerzos les han llevado al éxito⁹⁸⁸. La mecánica cuántica ha de seguir sus pasos.

983A. Daneri, A. Loinger y G.M. Proserpi, Quantum theory of measurement and ergodicity conditions, *Nuclear Physics* **33**, 297-319 (1962)

984Incluso la calificaban de solipsista. M. Jammer, *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, *Ibid.* (p.395)

985Y también L. Rosenfeld que se adhirió a dicha teoría y consideraba que, estando en “completa armonía con las ideas de Bohr”, superaba las dificultades que presentaba la teoría de von Neumann

986L. Rosenfeld, *The Measuring Process in Quantum Mechanics* (1965) “Selected Papers of Leon Rosenfeld”, Ed. R.S. Cohen y J.J. Stachel. D. Reidel Publishing Company. London (1979) (p.538) En este trabajo Rosenfeld ofrece una explicación divulgativa de la teoría de D L P

987Como hemos visto que también manifestaba Schrödinger. Ver el apartado de “La imagen del mundo que ofrece la ciencia natural” del capítulo dedicado a este autor en este trabajo

988Según el punto de vista de Rosenfeld expresado en *Ibid* (p.538)

Por otra parte, la mecánica cuántica postula que a cada observable le corresponde un operador Hermitiano, pero sólo puede otorgarse un significado físico real a este símbolo matemático cuando se define conceptualmente el procedimiento por el que se mide la cantidad que se estudia. Y según von Neumann, como hemos visto, el significado de una cantidad del sistema I es dado por las modificaciones producidas por I en alguna cantidad del sistema II. El significado de la última cantidad de II es dado por las modificaciones determinadas por II en alguna cantidad de un sistema III y así sucesivamente. Si la cadena de von Neumann fuese infinita, es decir, no fuese nunca truncada, el significado físico de un observable del sistema I sería referido al de un observable del sistema II, el significado de este observable de II sería referido al de un observable del sistema III y así indefinidamente. Por tanto, nunca se conseguiría establecer el significado del primer ni de ningún observable.

Según Danieri, Loinger y Prospero, una teoría satisfactoria de la medida ha de empezar caracterizando las propiedades macroscópicas de un cuerpo grande –propiedades que han de ser objetivas– y ha de cortar la cadena infinita de von Neumann después del primer sistema macroscópico. Así, estos autores mantenían que hay que otorgar “un carácter objetivo a los estados macroscópicos de un sistema y considerar sus macro-observables como las cantidades a las cuales se atribuye un significado”⁹⁸⁹.

El modelo de Danieri, Loinger y Prospero estaba basado en la teoría de G. Ludwig⁹⁹⁰, quien consideraba el aparato de medida como un macrosistema que se encuentra en un estado termodinámicamente metaestable y, por consiguiente, es capaz de evolucionar hacia un estado termodinámicamente estable debido a la perturbación producida por un sistema microfísico. Por ejemplo, la cámara de burbujas contiene materia en un estado metaestable que precipita en un estado de equilibrio estable cuando se le provoca una pequeña alteración. Por esta razón, según Ludwig, la medida es una “inseparable cadena, no entre objeto y sujeto”, como von Weizsäcker manifestaba, sino entre un sistema microfísico y un sistema macrofísico⁹⁹¹.

Danieri, Loinger y Prospero ofrecieron un modelo que permite visualizar⁹⁹² de forma simple el proceso de medida. ¿Cómo? Considerándolo como una interacción entre el sistema atómico medido

989A. Danieri, A. Loinger y G.M. Prospero *Ibid.* (p.664)

990G. Ludwig había introducido la noción de observable macroscópico

991M. Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, *Ibid.* (p.489)

992Según Rosenfeld *Ibid.* (p.539)

y el aparato que registra; esta interacción lleva a la formación de un registro permanente relacionado de forma unívoca con una cantidad definida que caracteriza el estado del sistema atómico. Mas ¿cómo se produce el registro? Debido a su carácter macroscópico, éste no puede ser resultado directo de la interacción atómica inicial; dicha interacción sólo es el desencadenante. A partir de dicha interacción empieza en el interior del aparato de medida una reacción macroscópica que finaliza cuando se llega a un estado de equilibrio estable en el que aparece la marca del registro, es decir, el resultado de la medida que observamos.

El proceso desencadenante sólo dura un brevísimo intervalo de tiempo, del orden propio de las reacciones atómicas individuales, pero el proceso macroscópico necesita un intervalo más largo, denominado “tiempo de relajación”, que, aunque es breve en una escala macroscópica del tiempo, implica un gran número de reacciones atómicas.

El modelo de Daneri, Loinger y Prosperi⁹⁹³ se puede describir cualitativamente de la forma siguiente. Obviamente, las observaciones macroscópicas realizadas en un cuerpo no pueden definir completamente su estado cuántico. Así, para caracterizar las macroobservaciones, estos autores descomponen el espacio de estados del cuerpo en un número dado de variedades⁹⁹⁴ que tienen gran número de dimensiones. Los diferentes estados macroscópicos posibles corresponden a estas variedades. La primera cantidad interesante es la energía. Por esta razón, el conjunto de los posibles valores de la energía se divide en intervalos, en “capas”, cada una de las cuales contiene un número S de estados de energía. Así, los estados estacionarios de un cuerpo macroscópico corresponden a un espectro discreto de valores de energía, que difieren uno de otro por cantidades muy pequeñas a escala macroscópica. Cualquier cambio macroscópico en el cuerpo corresponde a transiciones entre estados de la misma capa. Pero para definir completamente el estado macroscópico del cuerpo es necesario tener en cuenta también otras cantidades.

Por ello, las capas de energía se dividen a su vez en “células”, respecto a intervalos de valores de otras cantidades de interés. Así, cada célula corresponde a una variedad de s_k estados. Hay gran cantidad de células en cada capa de energía. Casi todas ellas contienen números de estados s_k mucho más pequeños que el número total S de estados de energía de la capa. Pero hay unas células excepcionales, las correspondientes a los estados de equilibrio del cuerpo bajo determinadas

993Según la visualización que presenta Rosenfeld, *Ibid.* (p.540)

994 “manifolds”

condiciones externas, que contienen números de estados del mismo orden de magnitud que S . Cuando se da una perturbación, cualquiera que sea el estado inicial del cuerpo, su evolución natural le llevará finalmente, después de un tiempo del orden del tiempo de relajación, a la célula correspondiente al equilibrio bajo las condiciones dadas. Y entonces permanecerá, al menos durante un tiempo razonable, en esta célula, excepto en ocasionales excursiones a otras células, que corresponden a las habituales fluctuaciones. Y de esta manera aparecerá el resultado de la medida.

Pero el modelo de Daneri, Loinger y Prosperi, según el cual la parte microscópica del proceso de medida es el detonador de una amplificación en el aparato macroscópico de medida, no se podía aplicar, según Jauch, Wigner y Yanase⁹⁹⁵ a un tipo especial de medidas. Así, estos autores presentaron unos contraejemplos de procesos de medida que no se desarrollan de acuerdo con el esquema de Daneri, Loinger y Prosperi. El más sorprendente, manifiestan, es la “medida de resultado negativo” presentada por Renninger en 1960. En esta clase de medidas las superposiciones de las funciones de estado se resuelven sin que se perciba ningún proceso detonador microscópico. Por esta razón, estas medidas son de fundamental importancia en la teoría cuántica de la medida⁹⁹⁶

Aunque Jauch, Wigner y Yanase sólo hacen referencia al artículo de Renninger titulado “Messungen ohne Störung des Messobjekts”⁹⁹⁷, en que en un experimento mental se reduce la función de onda de un fotón sin que haya ninguna interacción de éste con el dispositivo, el autor previamente también había publicado el artículo “Zum Wellen-Korpuskel-Dualismus”⁹⁹⁸, en el que presentaba otro experimento que mostraba que hay un 25 % de posibilidades de saber que hay un objeto, colocado en el trayecto que se supone que sigue el fotón, aunque dicho fotón no sea absorbido por el objeto⁹⁹⁹. Ambos experimentos mentales, en los que hay observación sin perturbación aparente del objeto observado, eran considerados por M.Jammer como muy significativos para la teoría de la medida.¹⁰⁰⁰

995J.M.Jauch, E.P.Wigner y M.M.Yanase, Some Comments Concerning Measurements in Quantum Mechanics, *II Nuovo Cimento*, vol 48 B 11 Marzo (1967) (p. 150)

996M.Jammer, “The Philosophy of Quantum Mechanics”, *Ibid.* (p.493)

997*Zeitschrift für Physik*, **158**, 417-421, (1960) Traducido por W. De Baere como “Interaction Free Measurements”

998*Zeitschrift für Physik*, **136**, 251-261, (1953) Traducido por W. De Baere como “On Wave-Particle Duality”. Las dos traducciones aparecieron en “Quantum Theory. AIP Conference Proceedings. Melville, New York (2007). Volume 962 en “History of the Development of QM”. El artículo de 1953 se encuentra en p. 3 y el de 1960 en p.9.

999Por lo cual es un precedente de los experimentos libres de interacción, los IFM, de Elitzur y Vaidman

1000Por esta razón Jammer considera que está justificado hacer una digresión, en su desarrollo de la teoría de la medida, para exponer el contenido de los dos artículos de Renninger. M.Jammer, “The Philosophy of Quantum Mechanics”, *Ibid.*(p.493-496)

3. M. RENNINGER. NOTAS BIOGRÁFICAS

Mauritius Renninger (1905-1987) estudió física y realizó su tesis en Munich. En 1932¹⁰⁰¹ empezó a trabajar como ayudante de P.P. Ewald en el Institute of Theoretical Physics de la Technische Hochschule de Stuttgart. Allí entró en contacto con la cristalografía, la materia a la cual dedicó la mayor parte de su interés científico durante las siguientes décadas. Descubrió el que se denomina “efecto Renninger”, hoy conocido por todos los cristalógrafos y en 1937 publicó su trabajo fundamental¹⁰⁰², el artículo en el que describía dicho descubrimiento.

Por razones políticas dejó la universidad este mismo año y pasó a trabajar en la industria, donde colaboró con C.Herrmann. Sin embargo, en 1946 volvió a la universidad, concretamente al Crystallografie Institute de la Universidad de Marburg, donde se especializó en “la física de las interferencias de los rayos X”¹⁰⁰³. Su trabajo científico comprende aproximadamente 60 artículos, casi todos ellos dedicados a su especialidad, la cristalografía. Pero, entre ellos, destacan dos artículos que llaman la atención porque presentan un carácter muy diferente; ámbos tratan de temas conceptuales de la filosofía de la teoría cuántica, y con ellos Renninger interviene en el debate sobre la interpretación de los fundamentos de la mecánica cuántica¹⁰⁰⁴; la aportación que Renniger ofrece mediante estos artículos son unos experimentos mentales¹⁰⁰⁵ que piensa que se han de tener en cuenta al interpretar los principios básicos de dicha teoría. El interés de Renninger en los problemas fundamentales de la Mecánica Cuántica provenía ya¹⁰⁰⁶ de su participación en un curso ofrecido por P.P.Ewald en Stuttgart a finales de la década de los años 30.

La publicación de cada uno de estos dos artículos causó notable conmoción y provocó una profunda discusión¹⁰⁰⁷ entre los expertos en el tema. Como hemos visto, el primero apareció en 1953 con el título “Zum Wellen-Korpuskel-Dualismus”¹⁰⁰⁸, es decir, “Sobre la dualidad onda-partícula”¹⁰⁰⁹ y el

1001Según H.Burzlauff y P.Buck en *J. Appl. Cryst.*(1988). **21**, 385

1002M.Renninger, “Umweganregung, eine bisher unbeachtete Wechselwirkungserscheinung bei Raumgitterinterferenzen”, *Zeitschrift für Physik*, **106**, 141-176

1003Como el mismo Renninger manifestó en carta a A.Einstein de 30-5-1953

1004Tema de que hemos tratado en los apartados anteriores de este trabajo.

1005En la línea de los experimentos mentales que hemos visto en apartados anteriores que Einstein, Bohr, Heisenberg y Schrödinger utilizaron para defender sus tesis en el debate sobre los fundamentos y la interpretación de la Mecánica Cuántica.

1006Según M.Jammer en “The Philosophy of Quantum Mechanics”, *Ibid.* (p.493)

1007Según M.Jammer en “The Philosophy of Quantum Mechanic”, *Ibid.* (p.494 y 495)

1008M.Renninger, “Zum Wellen-Korpuskel-Dualismus”, *Zeitschrift für Physik*, **136**, 251-261, (1953)

1009Traducido por W. De Baere como “On Wave-Particle Duality” y presentado junto al artículo de este autor “Renninger's Thought Experiment: Implications for Quantum Ontology and for Quantum Mechanics’

segundo en 1960 con el título “Messungen ohne Störung des Messobjekts”¹⁰¹⁰, que ha sido traducido como “Medidas libres de interacción”¹⁰¹¹

4.“SOBRE LA DUALIDAD ONDA-PARTICULA”, EL ARTICULO DE RENNINGER(1953)

4.1 INTRODUCCIÓN: RELACIÓN CON EINSTEIN

Durante 1953 y 1954 Renninger y Einstein mantuvieron una correspondencia que se inició cuando el primero envió al segundo una versión del artículo previa a su publicación. La opinión de Einstein era sumamente importante para Renninger y éste mostraba que necesitaba la aprobación de una primera autoridad en física teórica como era Einstein en aquel momento. En estas cartas Renninger reiteradamente expresaba el respeto y la admiración que sentía hacia Einstein. Ambos se encontraban en la misma línea de pensamiento, la que les enfrentaba a la interpretación dominante, mas Einstein era una personalidad reconocida que se hallaba en la primera fila de la polémica y, en cambio, Renninger era un fisico experimental especializado en el tema de las interferencias de rayos X¹⁰¹², desconocido fuera del campo de su especialidad. Por esta razón, Renninger manifestaba sus ideas sobre la interpretación de los fenómenos cuánticos con modestia y suma prudencia. Con estas palabras Renninger expresaba su satisfacción por la respuesta que le había dado Einstein, después de haber leído su artículo:

Su amable carta supuso para mí una gran alegría y aún más la valoración aprobatoria de la obra que le envié. Es la primera valoración positiva y sin reservas que recibo de parte de un fisico teórico y me alegro muy especialmente de que ésta provenga de usted. He recibido muchas objeciones y no todas en

Interpretation”, *Quantum Theory, AIP Conference Proceedings*. Melville, New York (2007) Volume 962. arXiv: quant-ph/0504031v1 5 Apr 2005

1010 Una traducción más literal sería “Medidas sin perturbación de los objetos”. M. Renninger, Messungen ohne Störung des Messobjekts, *Zeitschrift für Physik*, **158**, 417-421, (1960)

1011 Traducido por W. De Baere como Interaction-free Measurements. *Quantum Theory, AIP Conference Proceedings*. Melville, New York (2007) Volume 962

1012 :Renninger le escribía a Einstein: “Si [...] me permitiera darle una pequeña impresión personal de mi parte, le diría que mi área de trabajo es en realidad la física de interferencia de rayos X, en la que en círculos cristalográficos tengo algún renombre. Los problemas aquí tratados están bastante alejados de mi especialidad”.

el mismo sentido. Por otra parte, en otras ocasiones mis afirmaciones se han considerado triviales.¹⁰¹³

Renninger se mostraba extremadamente cauto y reconocía que se estaba introduciendo en temas que ya se habían tratado desde la perspectiva del formalismo matemático, campo en el que no se sentía seguro, puesto que no era cercano al dominio de su especialidad. Pero, por otra parte, pensamos que precisamente esta especialidad le había llevado a realizar múltiples y sutiles experimentos de interferencias de radiación que le habían permitido percibir unos efectos que eran muy significativos para la interpretación de los fenómenos cuánticos –dominio en el que hemos visto que había profundas diferencias entre el punto de vista de unos físicos teóricos y el de otros–. Por esta razón, Renninger creía que dichos efectos habían de ser conocidos por quienes se interesaban en los problemas de la fundamentación de la mecánica cuántica. Así escribía a Einstein:

No me siento llamado en mi calidad de físico experimental a hacer un juicio de las diferentes perspectivas teórico-matemáticas enfocadas al desarrollo de una teoría completa, en relación a los experimentos para la demostración de los cuales los modelos que funcionan causalmente son posibles, en oposición a von Neumann, y, por tanto, me niego a expresarme al respecto. Mi deseo era únicamente mostrar a qué conclusiones puede llevar una reflexión puramente físico-experimental.[...]

Los hechos son lo primero; en segunda línea aparecen las dificultades para explicarlos y éstas no pueden poner en tela de juicio los hechos.¹⁰¹⁴

Como vemos, Renninger no se atreve a manifestar sus pensamientos sobre la posibilidad de los desarrollos teóricos causales en mecánica cuántica, en contra de von Neumann¹⁰¹⁵, aunque creemos que admite un modelo causal, puesto que¹⁰¹⁶, como vamos a ver, otorga a la noción de causa una función fundamental en su trabajo, en su definición del concepto de “realidad física”. Así pues, veremos que al principio de su artículo Renninger establece que el concepto de “realidad física” ha de entenderse como el de una entidad que puede mostrarse, en un espacio y un tiempo determinados, “causalmente” influida por la actuación del experimentador. Pero en la cita anterior vemos que no quiere posicionarse en un tema que ha sido tratado matemáticamente de forma exhaustiva. No penetra en absoluto en el formalismo cuántico¹⁰¹⁷. Renninger sólo pretende mostrar

1013 Carta de M. Renninger a A. Einstein, datada el 30 de mayo de 1953

1014 Carta de M. Renninger a A. Einstein, datada el 30 de mayo de 1953

1015 Ver el tema de las variables ocultas en el apartado del problema de la medida de este capítulo

1016 Además de mostrarse intelectualmente cercano a Einstein.

1017 Como sí hacen posteriormente Elitzur y Vaidman, quienes, como veremos, expresan la superposición de estados del fotón en cada parte del dispositivo con el simbolismo estándar de la mecánica cuántica.

de forma cualitativa los fenómenos que ha percibido en su experimento y argumentar conceptualmente las conclusiones que de ellos ha inferido. En este sentido Renninger se muestra metodológicamente positivista: "los hechos son lo primero" y los problemas que presenta su interpretación no han de hacer olvidar los hechos tal como aparecen ante nuestros sentidos; es decir, las dificultades con que nos encontramos para explicarlos no han de llevar a alterarlos y desfigurarlos. Por esta razón, Renninger manifiesta que muestra simplemente los hechos tal como son¹⁰¹⁸. Otros científicos, los físicos teóricos, son quienes han de interpretarlos e integrarlos en el sistema formal de la teoría cuántica, para que dicha teoría sea completa.

4.2 OBJETIVO DEL ARTÍCULO

Renninger señala ya en el resumen inicial del artículo que tiene el objetivo de mostrar, a través de un experimento mental, que a "una única partícula se le puede asociar una onda que se propaga en el espacio y el tiempo", porque quiere probar que esta onda no indica sólo una distribución de probabilidades¹⁰¹⁹, sino que es una "realidad física", es decir, una entidad existente en el mundo, no sólo una entidad matemática. Así, Renninger se está refiriendo a la interpretación estadística de Born¹⁰²⁰, que era la respuesta que se había impuesto a la pregunta de qué son las ondas¹⁰²¹ como uno de los dos aspectos constituyentes de la realidad. Renninger no niega esta interpretación, pero veremos que no se conforma con ella¹⁰²².

Renninger mantiene que ha llegado a su conclusión de una manera nueva, como nunca antes se había hecho. También señala que trabaja en un contexto científico en que los temas de la mecánica

1018M.Renninger, On Wave-Particle Duality, (1953) (p.4)

1019Renninger se encuentra en la línea de los oponentes a la interpretación de Copenhague, como Schrödinger, de quien Heisenberg escribió: "...no se propone interpretar las ondas como 'solamente ondas de probabilidad'" *Física y filosofía* (p.119)

1020Las ondas de Born no son propiedades reales del mundo físico, es decir, no corresponden a vibraciones de ningún substrato básico del universo. Sólo son observables a través de la medida de $|\psi|^2$ como densidad de probabilidad de encontrar una partícula en un volumen elemental, siendo entendida la partícula como una masa puntual que en cada instante tiene una posición y un momento definidos(M Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics, Ibid.* (p.43). Así pues, la interpretación estadística de Born asume, según Selleri, presupuestos antirrealistas. F.Selleri, *El debate de la teoría cuántica*, Alianza Editorial. Madrid (1986), (p.95)

1021Hemos tratado este problema en el capítulo referido a Schrödinger, especialmente en los apartados de "Las ondas de de Broglie", "Las ondas de Schrödinger", "El problema del significado de la función de onda" y "El gato de Schrödinger"

1022De la misma manera que hemos visto que Einstein tampoco se conformaba con la interpretación probabilística aceptada por la escuela de Copenhague. Así, en una carta a Born en 1926 escribía: "La mecánica cuántica es impresionante. Pero una voz interior me dice que no constituye aún la última palabra. La teoría explica muchas cosas, pero realmente no nos acerca más al secreto de "El Viejo". Yo, en cualquier caso, estoy convencido de que El no juega a los dados". Y en 1927 Einstein declinó la invitación a participar en el V Congreso Solvay alegando que "no apruebo la forma de pensar puramente estadística sobre la que están basadas las nuevas teorías"

cuántica, especialmente el de la dualidad onda-partícula, se estudian sólo desde una perspectiva matemática y se desprecia la visualización. Renninger, en cambio, valora la visualización. Continúa considerándola un valor de los modelos científicos como, según Forman¹⁰²³, consideraban la *Anschaulichkeit* los creadores de la mecánica cuántica, por influencia del ambiente intelectual de la época en que nació esta teoría. Sin embargo, entre los autores estudiados, hemos encontrado que Bohr renunciaba a la visualización en el dominio atómico como consecuencia del postulado cuántico, por la inevitable perturbación que el dispositivo de observación provoca en el objeto observado. Precisamente, los experimentos de Renninger veremos que van a mostrar que dicha perturbación no es inevitable.

Mas Renninger piensa que la visualización es un recurso útil. Visualizar significa imaginar un proceso que no vemos como si realmente lo viéramos; para ello utilizamos imágenes de objetos que sí vemos con nuestros propios ojos. Hay muchos aspectos del mundo que queremos conocer y no podemos percibir directamente con nuestros propios ojos, como ocurre con los fenómenos que estudia la mecánica cuántica. Pero esta dificultad no significa que sea necesario renunciar a la visualización, que constituye una insustituible ayuda para nuestro entendimiento, puesto que facilita la comprensión de los procesos que están muy alejados de nuestros sentidos, los hace más inteligibles; al hacer que dichos procesos sean similares a los procesos que percibimos, nos los acerca. Así pues, la visualización es útil para nuestra comprensión de los fenómenos más recónditos de la naturaleza, puesto que los hace más intuitivos, pero hay que utilizarla con cautela, siendo conscientes del alcance que, en cada situación particular realmente puede tener. La mayoría de personas –cuyo sentido más utilizado es la vista– que quieren entender la naturaleza física aspiran de forma natural e instintiva a visualizar el funcionamiento interno de los procesos que en ella se dan. Y se sienten intelectualmente satisfechas cuando lo consiguen. No ser capaz de visualizar los fenómenos que intentan comprender es considerado por muchas de estas personas como una frustración intelectual. Por esta razón, Renninger mantiene que el desarrollo matemático del tema de la dualidad onda-partícula, que realizan otros físicos, no ha de impedir la búsqueda de una visualización, no ha de permitir renunciar a una comprensión intuitiva de sus procesos. Hay que actuar con cautela y establecer límites a la visualización, pero estos frenos no han de ponerse de antemano, por principio, de manera que eviten toda intuición. La prudencia no ha de impedir realizar interesantes y audaces desarrollos de visualización como el que Renninger propone. Así, escribe:

1023 Ver el apartado sobre la individualidad, la visualización y la acausalidad del quinto capítulo de este trabajo

la visualización no ha de abandonarse *demasiado pronto* sino que ha de mantenerse tanto como sea posible. Claramente hay un límite, pero éste no ha de ponerse artificialmente para excluir posibles desarrollos interesantes. Precisamente el propósito de este trabajo es presentar un tal desarrollo ¹⁰²⁴.

Esta visualización que Renninger propone consiste en ver lo que Renninger ha visto a través de su experimento mental, es decir, " que a *una única* partícula se le puede asociar una onda que se propaga en el espacio y el tiempo como *una realidad física*, es decir, que no ha de ser considerada simplemente como una distribución de probabilidades"¹⁰²⁵

Por "realidad física" manifiesta Renninger entender una entidad que,

cuando se la considera en un espacio particular en un tiempo particular, debe ser experimentalmente posible influir en ella de manera que los futuros resultados de los experimentos muestren de forma inambigua que esta entidad ha sido causalmente influida por la actuación experimental que se ha realizado en dicho espacio durante aquel determinado tiempo¹⁰²⁶.

Así pues, Renninger se propone mostrar a lo largo de su artículo cómo las acciones que realice en el dispositivo experimental van a alterar lo que en él se observe. Él, como experimentador, tiene la capacidad de alterar con sus actos las manifestaciones del objeto que observa. Por consiguiente, este objeto en el que tiene el poder de influir con acciones físicas, existe realmente, es decir, es una auténtica realidad física, puesto que si no existiera en el mundo, si no fuera real físicamente, no la podría modificar según su voluntad.

Como vemos, la noción de "realidad física" de Renninger es muy cercana a la de "elemento de la realidad física" de EPR. El mismo autor declara que su noción de "realidad física" está basada en el concepto de "elemento de la realidad física" de EPR¹⁰²⁷. Renninger lo manifiesta explícitamente con estas palabras:"nuestra definición de 'realidad física' estaba inspirada en la definición de Einstein, Podolsky y Rosen de la misma noción"¹⁰²⁸

1024M.Renninger , On Wave-Particle Duality, (1953) (p.2)

1025M.Renninger. Abstract de On Wave-Particle Duality, (1953)

1026M.Renninger , On Wave-Particle Duality,(1953) (p.2)

1027Ver el apartado "La noción de realidad física en EPR" del capítulo dedicado al realismo de Einstein en este trabajo

1028M.Renninger, On Wave-Particle Duality, (1953) (p.8)

Así pues, desde el principio del artículo, se percibe inmediatamente que su autor está pensando en términos propios del debate que desde hacía años se estaba manteniendo¹⁰²⁹ en círculos físicos y filosóficos acerca de la interpretación de los fundamentos de la mecánica cuántica, debate que, protagonizado por Einstein y Bohr, dividió a la comunidad de físicos cuánticos en dos grupos, los seguidores de la interpretación de Copenhague y sus oponentes.

4.3. CONTEXTO DEL ARTÍCULO

4.3.1. El legado de Einstein

Recordemos que EPR respondían a la pregunta ¿qué es un elemento de la realidad física? con la siguiente noción: *”Si, sin perturbar un sistema podemos predecir con certeza (es decir, con probabilidad igual a la unidad)¹⁰³⁰ el valor de una cantidad física, entonces allí existe un elemento de la realidad física correspondiente a esta cantidad física”¹⁰³¹*. Es evidente que esta noción¹⁰³² constituye el germen de la de Renninger, puesto que hay una estrecha relación entre predecir posteriores observaciones, como manifiestan EPR, e influir experimentalmente en una entidad de forma que posteriores resultados de los experimentos muestren que la entidad ha sido causalmente influida por el acto experimental.

Recordemos que EPR aceptaban que su noción de “elemento de la realidad física” estaba muy lejos de satisfacer todas las condiciones requeridas para reconocer una realidad física y, por esta razón, manifestaban que la anterior condición no constituye una condición necesaria de la realidad sino tan solo una condición suficiente. Es ésta una noción no especulativa, no filosófica, y por eso se puede utilizar en el campo de la experimentación, que es el dominio en el que se mueven tanto EPR como Renninger. Sin embargo, a partir del terreno empírico, tanto EPR como Renninger llegan a la

1029 En una nota al pie de la primera página del artículo de Renninger aparece que éste había sido aceptado para su publicación después de que la correspondencia de su autor con dirigentes físicos cuánticos del momento había convencido a los editores de *Zeitschrift für Physik* de la significación del contenido de dicho artículo. Los dirigentes de la física cuántica en los años 50 eran Einstein, Heisenberg, Born, Jordan, Pauli, Dirac,...etc y Renninger había discutido sus ideas con ellos, según comunicación privada de W. De Baere, quien cree que los autores que aprobaron la publicación del artículo de Renninger eran uno o dos de aquellos físicos.

1030 Lo cual constituye una idealización, porque en la realidad no se pueden realizar predicciones absolutamente seguras.

1031 A. Einstein, B. Podolsky y N. Rosen, Can quantum mechanical description of physical reality be considered complete? *Physical Review* (1935), **47**: 777-80

1032 Esta noción, por otra parte, presenta un carácter creativo que recuerda la naturaleza de los conceptos en general de los que Einstein decía que eran “libres creaciones de la mente”

especulación filosófica, puesto que a partir de sus experimentos mentales EPR y Renninger extraen conclusiones epistemológicas y ontológicas.

Por otra parte, hemos visto que en el marco conceptual del artículo de Renninger a la noción de causa se le concede un valor fundamental, lo cual le acerca también a Einstein, dentro de cuyo programa realista¹⁰³³ la relación de causalidad desempeña, como hemos visto, una función esencial. Así pues, Renninger incluye la noción de causalidad en su concepto de “realidad física”, pues establece que es realidad física aquella entidad en la cual se puede causalmente influir con una actuación experimental, lo cual se muestra de forma precisa a través de los resultados de dicha actuación. Así veremos que Renninger probará que la onda es una realidad física porque, con las acciones que realizará como experimentador, será capaz de modificar, de controlar, las manifestaciones de dicha onda .

Einstein defendía, como hemos visto, el uso¹⁰³⁴, por parte del investigador físico, de la noción de causa¹⁰³⁵, apoyándose en los éxitos que había obtenido la física a través de la historia utilizando la relación de causalidad; la física clásica se había basado en la concepción causal, según la cual los hechos del mundo exterior siguen un desarrollo causal, es decir, gobernado por leyes estrictas. Si conocemos las condiciones iniciales de un objeto y las leyes que influyen sobre él se puede conocer todo estado futuro de dicho objeto. Aunque Einstein manifestara que no se podía saber si el mundo es causal o no, la historia de la física le mostraba que las teorías causales eran más productivas que las acausales y la noción de causa era un concepto creado por el entendimiento para entender la experiencia¹⁰³⁶. A Einstein le parecía que los descubrimientos cuánticos no ofrecían motivos suficientes para renunciar definitivamente a la relación de causalidad. Y éste era también el punto de vista de Renninger, quien, como investigador experimental, pretendía comprender la naturaleza de la luz desde una perspectiva empírica. Para ello observaba atentamente lo que ocurría cuando realizaba determinadas acciones en sus dispositivos de medida y, para explicar cómo y por qué a las mismas actuaciones seguían regularmente los mismos resultados, utilizaba la relación de causalidad.

1033Ver el apartado “Características del realismo de Einstein” del capítulo dedicado al realismo de Einstein

1034También Schrödinger aconsejaba usar la noción de causa si era útil, porque aceptar el principio de causalidad favorecía la predisposición mental más conveniente para acercarse a la Naturaleza y comprenderla de manera simple y clara. Ver el apartado dedicado al tema de la causalidad y el azar del capítulo de Schrödinger

1035Ver el apartado “Características del realismo de Einstein” del capítulo dedicado al realismo de Einstein,

1036Este punto de vista de Einstein puede considerarse como un vestigio de la influencia que sobre él ejerció Mach, quien mantenía que no se puede probar la tesis determinista ni la indeterminista pero ello no afecta a los científicos que cuando investigan son necesariamente deterministas. Ver el apartado dedicado a Mach del capítulo sobre Schrödinger

Pero la teoría cuántica había abandonado la concepción causal clásica y la había reemplazado por una concepción estadística. Según Einstein, este abandono no había de ser definitivo, sólo podía ser provisional. La interpretación estadística no era suficiente para Einstein, porque no ofrecía una explicación de la realidad. De la misma manera, tampoco era suficiente para Renninger, puesto que también pensaba que no daba una explicación de la auténtica realidad física que constituye la onda de un sistema cuántico.

Además, Einstein no sólo creía que los fenómenos cuánticos no requerían un debilitamiento de la causalidad clásica sino que exigían un reforzamiento de ella¹⁰³⁷. Según Einstein, el éxito de la física clásica constituía el éxito del credo realista, uno de cuyos componentes era, como hemos visto, la aceptación del principio de causalidad y el carácter de los fenómenos cuánticos, como la dualidad onda-partícula que estudiaba Renninger, no justificaba en absoluto el abandono de dicho principio.

Finalmente, encontramos en el artículo de Renninger la sospecha de que la mecánica cuántica no es una teoría completa. Esta es la conclusión explícita y contundente de EPR. Y es también una conclusión implícita de Renninger, pero expresada tímidamente, con suma cautela.

4.3.2.Frente a Bohr, Jordan y Heisenberg

Para entender la naturaleza de la luz, se han ofrecido dos imágenes, la de onda y la de partícula y se han presentado experimentos que han mostrado una imagen o la otra¹⁰³⁸. Según Renninger, siempre se ha destacado que no existe el experimento que revele simultáneamente las propiedades ondulatorias y corpusculares de la luz y que a la vez muestre el comportamiento ondulatorio de un solo fotón o electrón. Pero Renninger cree que ha descubierto este experimento, lo ha imaginado y lo ha elaborado mentalmente al detalle; por esta razón, el objetivo principal de su artículo es presentarlo públicamente.

Así pues, Renninger escribe contra la noción de complementariedad¹⁰³⁹ ofrecida por Bohr¹⁰⁴⁰ –uno

1037 Ver el apartado “Características del realismo de Einstein” del capítulo dedicado a Einstein

1038 Por ejemplo, la interferencia y la difracción, por una parte, y, por otra parte, el efecto fotoeléctrico y el efecto Compton.

1039 Como muestra W.De Baere (2005) (p.4)

1040 Quien aplicaba esta noción a la doble naturaleza de la luz –ver el subapartado titulado “Aparición de la noción de complementariedad– y a la doble naturaleza de la luz y de las partículas elementales –ver el subapartado titulado “La conferencia de Como”– del capítulo dedicado a Bohr en este trabajo

de los conceptos básicos de la interpretación de Copenhague— según la cual para que se manifieste la dualidad onda-partícula se necesitan dos diferentes y mutuamente excluyentes dispositivos experimentales. Según Bohr, la noción de fotón y la noción de onda son ideas auxiliares de carácter simbólico para la descripción de la luz y la materia, pero cuando se utiliza una de las dos nociones no hay lugar para la otra. El uso que se haga de una noción o de la otra depende de la particular disposición del dispositivo experimental. Por consiguiente, hay que utilizar distintos dispositivos para medir distintas magnitudes. En palabras de Bohr:

El carácter simbólico de las ideas auxiliares de fotón y de onda material se manifiesta también en el hecho de que la descripción completa de los campos de ondas electromagnéticas no deja lugar alguno a los fotones y que, de la misma manera, la idea de onda material no proporciona nunca una descripción completa comparable a la de las teorías clásicas [...] Por consiguiente, el uso que se hace de los métodos simbólicos dependerá en cada caso concreto de la particular disposición del montaje experimental. Ahora bien —y ésta es precisamente la característica peculiar de la descripción cuántica— el cuanto de acción nos obliga a utilizar distintos dispositivos experimentales para obtener una medida exacta de las diferentes magnitudes cuyo conocimiento simultáneo sería necesario para una descripción completa basada en las teorías clásicas¹⁰⁴¹.

Por tanto, para describir la propagación de la luz hemos de escoger entre la descripción ondulatoria y la corpuscular:

nuestra descripción de los fenómenos de radiación nos enfrenta a un dilema si queremos hacer una elección entre la descripción ondulatoria dada por la teoría electromagnética y la concepción corpuscular de la propagación de la luz contenida en la teoría de los fotones¹⁰⁴².

En cambio, Renninger mantiene, como vamos a ver, que el paso de un fotón¹⁰⁴³ a través del interferómetro Mach-Zehnder muestra simultáneamente, en un único experimento, el aspecto

1041N.Bohr, *La teoría atómica y la descripción de la Naturaleza, Ibid.* (p. 65)

1042N.Bohr, *La teoría atómica y la descripción de la Naturaleza, Ibid.* (p. 60)

1043“de un único sistema cuántico” dice W.De Baere (2005), (p.4), porque al principio Renninger, como hemos visto, escribe que puede mostrar el comportamiento ondulatorio de un fotón o electrón, pero posteriormente, a lo largo del artículo aplica su experimento sólo a fotones. Así, por ejemplo, Renninger manifiesta que asume que “ el resultado del experimento de interferencia es el mismo si los fotones contribuyen en un largo período de tiempo o en un breve período: cada fotón interfiere sólo consigo mismo” (Renninger, 1953,p.4); el último enunciado Renninger lo ha extraído, como él mismo dice, de Dirac, quien lo justifica con el siguiente ejemplo: en un haz de fotones dividido en dos componentes de igual intensidad, un fotón se encuentra parcialmente en cada una de los dos componentes y entonces cada fotón interfiere únicamente consigo mismo. P.A.M.Dirac, *Principios de Mecánica Cuántica*.Ediciones Ariel. Barcelona (1967)

corpúscular y el aspecto ondulatorio de la radiación.

Renninger cita, en particular, a P. Jordan¹⁰⁴⁴, a quien se opone por mantener, en la misma línea de pensamiento de Bohr, que no se pueden mostrar las dos propiedades de la naturaleza de la luz en un único experimento:

Cualquier experimento que mostrara *simultáneamente* las propiedades ondulatorias y corpúsculares de la luz no sólo estaría en oposición con la teoría clásica (a *tal* oposición hemos de acostumbrarnos), sino que sería además un *absurdo lógico-matemático*. [...] Necesitamos quizás en primer lugar realizar un experimento de interferencia con un rayo de luz y después someter la luz que atraviesa este aparato a un experimento que demuestre los cuantos de la luz. Pero es *imposible* que un único e indivisible acto experimental muestre tanto *una* como la *otra* propiedad de la naturaleza de la luz¹⁰⁴⁵.

Renninger también se opone a Heisenberg, quien al respecto defiende la misma posición que Bohr y Jordan. Según Heisenberg, “está claro que la materia no puede existir al mismo tiempo como onda y como partícula, ya que ambas nociones son muy diferentes”¹⁰⁴⁶. Veamos cómo explica su punto de vista:

A partir de estos experimentos [fotografías de Wilson, difracción de ondas de materia por Davisson y Germer, por Thomson y por Rupp, difracción de rayos-X, experimento de Compton-Simon, experimentos de colisión de Franck y Hertz] se ve que la materia y la radiación poseen una remarcable dualidad de carácter, tal que unas veces muestran las propiedades de las ondas y otras las de las partículas. Ahora es obvio que una cosa no puede ser una forma de movimiento de onda y, al mismo tiempo, estar compuesta de partículas –ambos conceptos son demasiado diferentes. Es cierto que se ha de postular que dos entidades separadas, una que tiene todas las propiedades de una partícula, y la otra que tiene todas las propiedades del movimiento de onda, se combinan de alguna manera para formar la “luz”. Pero tales teorías son incapaces de producir la íntima relación entre las dos entidades que parece ser requerida por la evidencia experimental. Como una cuestión de hecho, es experimentalmente cierto que la luz a veces se comporta como si poseyera algunos de los atributos de una partícula, pero no hay experimento que pruebe que posee todas las propiedades de una partícula; similares enunciados se

1044 Recordemos que Jordan y Born, continuando el trabajo inicial de Heisenberg, habían hecho de la mecánica de matrices de éste una teoría sistemática que había constituido la primera formulación rigurosa de la mecánica de matrices, en la cual cada variable y cada función de la mecánica clásica era interpretada como una matriz. Posteriormente, Born, Jordan y Heisenberg habían publicado un nuevo trabajo que ofrecía la exposición completa de la mecánica de matrices y que significó la primera fundamentación rigurosa de la mecánica cuántica. Ver el apartado del nacimiento de la mecánica de matrices del capítulo de la concepción filosófica de Heisenberg en este trabajo

1045 P. Jordan, *Anschauliche Quantentheorie*. Verlag von Julius Springer (1936) (p. 115)

1046 W. Heisenberg, *The Principles of Quantum Theory*. Dover Publications (1930)(p.7)

mantienen para la materia y el movimiento de onda. La solución de la dificultad es que las dos imágenes mentales que los experimentos nos llevan a formar –una de partículas y la otra de movimiento de ondas-- son ambas incompletas y sólo tienen la validez de las analogías que son adecuadas sólo en casos límites. Es un dicho vulgar que “las analogías no pueden llevarse demasiado lejos”. No obstante, pueden ser justificadamente usadas para describir cosas para las que nuestro lenguaje no tiene palabras. Luz y materia son entidades únicas y la aparente dualidad surge de las limitaciones de nuestro lenguaje.

No es sorprendente que nuestro lenguaje sea incapaz de describir los procesos que ocurren en el interior de los átomos, porque, como ha sido remarcado, fue inventado para describir las experiencias de la vida diaria y éstas consisten sólo en procesos que implican números sumamente elevados de átomos¹⁰⁴⁷.

Como vemos, Heisenberg, al igual que Bohr¹⁰⁴⁸, atribuía la dificultad de explicar la doble naturaleza de la luz y de la materia a la insuficiencia del lenguaje, que había sido creado en el marco de las experiencias de la vida cotidiana, con la percepción de objetos macroscópicos, compuestos de gran número de átomos.

Continuaba Heisenberg:

Afortunadamente las matemáticas no están sujetas a esta limitación [la del lenguaje] y ha sido posible inventar un esquema matemático –la teoría cuántica—que parece enteramente adecuada para el tratamiento de los procesos atómicos; para la visualización, no obstante, hemos de contentarnos con dos analogías incompletas – la imagen de onda y la de corpúsculo.[...] Como Bohr ha mostrado, ésta es la base de una derivación muy simple de las relaciones de incertidumbre entre coordenadas y momento de una partícula.

Recordemos¹⁰⁴⁹ que para Bohr el principio de indeterminación de Heisenberg daba consistencia a la dualidad onda-partícula, porque eliminaba la contradicción entre los dos modelos, ya que nunca se habían de aplicar al mismo objeto en el mismo experimento

Pero, a pesar de sus objeciones a Bohr, Jordan y Heisenberg, Renninger señalaba en una intervención el mismo año 1953, en un encuentro de físicos al que asistían Heisenberg y

1047W.Heisenberg, *Principles of Quantum Theory* Dover Publications (1930),(p.10)

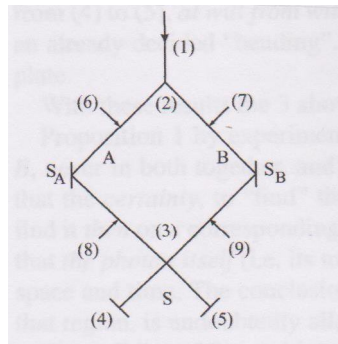
1048Ver el apartado del lenguaje del capítulo de Bohr

1049Ver el apartado “El principio de incertidumbre” del capítulo de Bohr y el apartado “Respuesta de Bohr” del capítulo de Heisenberg

Schrödinger, que no pretendía sustituir la interpretación ortodoxa por una nueva teoría sino tan solo pretendía mostrar lo que una teoría completa del microcosmos había de poder explicar¹⁰⁵⁰.

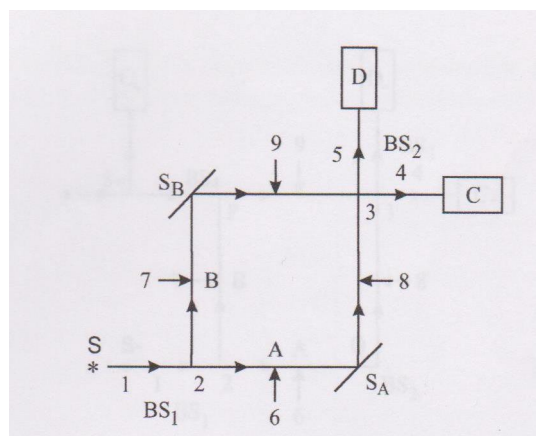
4.4 EL EXPERIMENTO

El dispositivo experimental de Renninger es¹⁰⁵¹ en esencia un interferómetro Mach-Zehnder cuyo esquema representa con la siguiente figura:



(Fig. 4.1)

Posteriormente De Baere representa el mismo esquema con esta figura, que resulta más intuitiva:



(Fig. 4.2)

1050M.Jammer, "The Philosophy of Quantum Mechanics", *Ibid.* (p.494)

1051Seguiremos la explicación que, por su adecuación y claridad, ofrece W. De Baere del dispositivo experimental de Renninger en "Renninger's ..." (2005) (p.3)

Renninger desarrolla su experimento de la manera siguiente:

De una fuente situada en el punto 1 salen fotones que se dirigen a un divisor de haz del 50% situado en el punto 2, que divide el haz de fotones en dos partes, el haz transmitido y el haz reflejado. A partir de este punto 2 hay dos caminos, el paso 6 y el paso 7; por uno de ellos se desplaza un haz y por el otro se desplaza el otro haz; uno se dirige al espejo S_A y el otro al S_B . Así, estos espejos S_A y S_B reflejan los fotones que llegan por los pasos 6 y 7. Los fotones reflejados se dirigen por los caminos 8 y 9 a un segundo divisor de haz que se encuentra situado en el punto 3 y que divide de nuevo el haz en dos partes, que interfieren finalmente en los puntos 4 y 5 donde se encuentran dos detectores, D_1 y D_2 .

Renninger mantiene que en su argumentación sólo va a tener en cuenta hechos empíricos independientes de cualquier teoría. Estos hechos empíricos son los siguientes:

a) Si se coloca, en el paso A o en el paso B, es decir, en el brazo 6-8 o el 7-9, un objeto absorbente – como una lámina o una pantalla opaca– que constituye un detector porque registra cada fotón que es absorbido por dicho objeto; la detección del fotón ocurre sólo en uno de los pasos, no en ámbos al mismo tiempo, puesto que es el objeto que está en un brazo o el otro el que absorbe el fotón, que es único e indivisible.

Esto muestra la naturaleza corpuscular de los fotones que atraviesan el interferómetro.

b) Si las longitudes de los pasos 6-8 y 7-9 son iguales, a cada fotón que se desplace por el interferómetro corresponde con seguridad un destello observado en D_1 y ninguno en D_2 .

Esto muestra la naturaleza ondulatoria de los fotones, puesto que en D_1 se observa el brillo que corresponde a la interferencia constructiva de las ondas que llegan por las dos rutas y, en cambio, en D_2 sólo se percibe la oscuridad que corresponde a su interferencia destructiva.

c) Pero, si, antes de que el fotón pase, se inserta, en un punto de los pasos 6-8 o 7-9, una lámina completamente transparente que provoca un cambio de fase de $\lambda/2$ en la onda, entonces no se

observa ningún destello en D_1 , sino que sólo se percibe destello en D_2 . Así pues, el cambio de fase ha provocado un cambio en el patrón de interferencia.

El hecho de que sea indiferente el camino en el que se inserte tanto el objeto absorbente como la lámina transparente es para Renninger una evidencia empírica de la simultánea existencia de la onda como realidad física en los dos caminos. Por el hecho explicado en el apartado a) Renninger postula la existencia de una onda, que se mueve por un camino y postula también la existencia de otra onda que contiene la partícula y que se mueve a través del otro camino. Para distinguirlas, W. De Baere denomina “la onda llena” a la segunda, porque transporta la partícula, y a la primera, “la onda vacía”. Así, Renninger escribe: “con cada fotón individual se halla asociada *una realidad física que se mueve simultáneamente por los dos pasos*”¹⁰⁵², es decir, el paso de la “onda llena” y el paso de la “onda vacía”; pero, aunque la onda se transmite por los dos caminos, sólo lleva energía en uno de ellos.

d)El resultado de la acción explicada en el apartado c), es decir, el hecho de llevar la detección del detector D_1 al D_2 puede suspenderse insertando posteriormente otra –o incluso la misma-- lámina en el mismo o en el otro camino. Y si los caminos son suficientemente largos esta acción puede repetirse un número arbitrario de veces, de manera que se puede *causalmente predecir*, es decir, con certeza, en qué detector D_1 o D_2 se observará el destello.

Este hecho, por su noción de realidad física, constituye para Renninger una evidencia empírica de la existencia de la onda como realidad física en los dos caminos¹⁰⁵³.

4.4.1 Cálculo de probabilidades

Las probabilidades de los distintos resultados posibles cuando se coloca un objeto en el paso 6-8 o el 7-9 son las siguientes:

Renninger calcula que hay dos posibilidades, cada una de ellas con una probabilidad del 50%:

1052M.Renninger, “On Wave-Particle Duality”, (1953) (p.7)

1053Es decir, de la que W.De Baere llama “onda llena” y la que llama “onda vacía”

α) Que el fotón sea absorbido por el objeto, fenómeno que tiene una probabilidad de ocurrir de $1/2$

β) Que el fotón no sea absorbido por el objeto, fenómeno que también tiene una probabilidad de $1/2$. Suponiendo que ocurra esto, hay dos posibilidades para lo que puede suceder posteriormente, cada una con una probabilidad de $1/2$ también; una posibilidad es que el fotón sea detectado en el detector final D_1 y la otra posibilidad es que sea detectado en el otro detector final, el D_2 .

Por tanto, en conclusión, Renninger ve que cuando se coloca un objeto en un brazo del interferómetro hay, por una parte, una probabilidad de $1/2$ de que éste detecte el fotón porque lo ha absorbido y, por tanto, el fotón ya no llegue al final y hay, por otra parte, una probabilidad de $1/4$ de que el fotón sea absorbido al final, detectándose en D_1 , como ocurre cuando no hay ningún objeto en el brazo del interferómetro; pero también hay una probabilidad de $1/4$ de que el fotón sea detectado en D_2 . Como hemos visto, si no hay ningún objeto en los brazos del interferómetro nunca se ilumina D_2 . Por consiguiente, el hecho de que se ilumine D_2 indica que en los brazos del interferómetro hay un objeto detector, que no ha detectado nada. Es decir, sólo se ilumina D_2 si en una de las rutas del interferómetro hay un obstáculo.

Renninger calculó las probabilidades adecuadamente, pero no interpretó el último fenómeno observado, lo que denomina “hecho empírico”, de la manera que acabamos de expresar, es decir, no extrajo explícitamente la última conclusión. Quienes sí la extrajeron años después, en 1993, fueron A. Elitzur y L.Vaidman, en su experimento de medida cuántica libre de interacción, en su IFM. Ellos con su experimento mental pretendieron probar que es posible mostrar la existencia de un objeto en un brazo del interferómetro sin que el fotón interfiera con dicho objeto. Si lanzamos un fotón a través del interferómetro hay $1/4$ de posibilidades de que esto ocurra, es decir, de que se pruebe que existe un objeto interpuesto sin que el fotón interactue con él.

4.4.2 Las tres proposiciones que Renninger pretendía probar

Con los resultados de su experimento Renninger pretendía probar las tres proposiciones¹⁰⁵⁴ siguientes¹⁰⁵⁵:

¹⁰⁵⁴M.Renninger, “On Wave-Particle Duality”, (1953) (p.3)

¹⁰⁵⁵Renninger declara que estas proposiciones las aplicará en primer lugar a la luz de longitud de onda visible pero “también son válidas, en una forma adecuada, a la radiación de otras longitudes de onda y a la radiación de la

1). La energía de cada fotón se concentra en una partícula que se desplaza a través de una trayectoria única y continua. Con sus propias palabras: "Es posible demostrar experimentalmente que la *energía* de cada fotón se mueve *a través del espacio y el tiempo* por un camino único y continuo y está concentrada en la forma de una partícula, es decir, en cada instante ocupa una región conectada del espacio"¹⁰⁵⁶.

2). A cada fotón le acompaña una onda que, aunque no lleva energía, tiene existencia real, puesto que se puede influir sobre ella. Así, Renninger declara que "es posible demostrar experimentalmente que *con cada fotón individual* puede asociarse una *onda guía*"; esta onda no tiene energía, pero es "causalmente" influenciable y, por tanto, constituye una auténtica realidad física.

Esta onda, aunque no tiene energía —ésta la única característica que la diferencia de la onda electromagnética—, obedece las leyes de propagación de una onda electromagnética, como las de difracción, las de interferencia y las de refracción; por esta razón, presenta claramente el carácter de una onda que se desplaza como tal en el espacio y en el tiempo; pero hay que tener en cuenta que el fotón, en su propagación como onda, ocupa en cada instante un lugar del espacio que no necesariamente se encuentra conectado de forma continua con los otros lugares del espacio .

3). La probabilidad de encontrar la partícula en un lugar del espacio es proporcional a la intensidad de la onda asociada con ella en dicho lugar. En palabras de Renninger: "La conexión en el *espacio* de la partícula de energía y el campo de la onda es tal que la primera puede ser encontrada en una región en que la intensidad de la onda es distinta de cero, con una probabilidad que es proporcional a dicha intensidad. Su velocidad de propagación es igual a la velocidad de la onda dentro de los límites impuestos por las relaciones de indeterminación de Heisenberg"¹⁰⁵⁷.

Como vemos, la primera proposición muestra el aspecto corpuscular de la radiación, la segunda el aspecto ondulatorio y la tercera relaciona los dos aspectos.

Las tres proposiciones son sintetizadas por su autor en el siguiente enunciado: "*Cada quantum*

materia", por ejemplo, a los electrones a que en un principio ha aludido pero de los cuales no ha vuelto a tratar.

1056 No obstante, Renninger no especifica la forma y extensión de dicha partícula

1057 M. Renninger, "On Wave-Particle Duality" (1953) (p.4)

consiste en una partícula de energía, “transportada” o “guiada” por una onda sin energía”¹⁰⁵⁸. Para Renninger tanto la partícula, con energía, como el campo, sin energía, que guía la partícula, son fenómenos empíricos que se pueden observar en el experimento que presenta.

Finalmente hay que tener en cuenta el sentido en el que Renninger usa el término “partícula” en las tres proposiciones que pretende probar. No utiliza “partícula” con el habitual significado de un pequeño objeto bien localizado que describe en el espacio, a través del tiempo, una trayectoria lineal, sino con un significado más abstracto y general, el de una unidad física que puede producir efectos locales en los que interviene totalmente (y jamás por fracción) y que no puede ser constantemente identificada con un objeto que describe una trayectoria lineal¹⁰⁵⁹. Con este segundo significado, el término partícula es más fácilmente aplicable al fotón que con el primero, puede asociarse mejor a la noción de onda y se puede integrar mejor en la concepción dualista de la luz.

4.4.3 La onda de Renninger

Renninger reconoce que su imagen no es nueva sino que ya fue formulada por de Broglie en 1927¹⁰⁶⁰ en términos de la “onda piloto”¹⁰⁶¹. Para éste la onda piloto tampoco no llevaba energía sino que de alguna manera guiaba la energía que se encontraba en la partícula. Renninger insiste en que la imagen de la partícula guiada por la onda desprovista de energía no es sólo una imagen que ayuda a

1058M.Renninger, “On Wave-Particle Duality” (1953) (p.4)

1059Este análisis proviene de de Broglie, quien utiliza el segundo significado del término “partícula” para referirse al fotón, del que sostiene que se caracteriza esencialmente por “la facultad de manifestar localmente su presencia como una unidad física indescomponible”. Según de Broglie a un corpúsculo como el fotón a veces no se le puede atribuir una trayectoria. Para que se le pudiera atribuir una trayectoria sería necesario poder señalar casi constantemente su posición haciéndolo producir acciones observables:”pero toda observación de ese género necesita la entrada en interacción del corpúsculo y hacer imposible el atribuirle, con certeza, una trayectoria”, por las relaciones de indeterminación de Heisenberg.

Por otra parte, la noción de corpúsculo como unidad física susceptible de producir efectos localizados se puede unir más fácilmente a la noción de onda que la noción de corpúsculo como objeto minúsculo y así constituir la concepción dualista de la luz. L. de Broglie. *Ondas, corpúsculos y Mecánica ondulatoria*. Espasa Calpe. Madrid (1949) (p. 69-71)

1060Y que abandonó durante 25 años y después aceptó de nuevo. De Broglie manifiesta que desde su lectura de la tesis en 1924 hasta el Congreso Solvay de 1927 siguió apasionadamente el desarrollo de la mecánica ondulatoria pero “se sentía continuamente fracasado por la cuestión de la interpretación física del formalismo de la nueva teoría y del sentido real del dualismo onda-partícula”. L. de Broglie en *La physique quantique restera-t-elle indéterministe?* Librairie du bureau des longitudes, de l'École Polytechnique. Paris (1953) (p.6). En un principio de Broglie dio una interpretación que él calificaba de más próxima a las ideas tradicionales de la física teórica pero, desanimado por las dificultades que esta interpretación comportaba y por las graves objeciones que planteaban los otros físicos teóricos, en 1928 renunció a su propia interpretación y “se adhirió sin restricciones” a la interpretación probabilística de la mecánica ondulatoria que defendían Born, Bohr y Heisenberg, según M.Renninger, “On Wave-Particle Duality” (1953) (p.4)

1061Ver el apartado de las ondas de de Broglie en el capítulo de Schrödinger de este trabajo

la comprensión visual de los procesos elementales ni es tampoco sólo un instrumento matemático para predecir los resultados de los experimentos futuros sino que constituye una auténtica realidad. Así, podemos decir que si de Broglie había pensado en la existencia de la “onda piloto”, Renninger pretendía probar dicha existencia. Éste pensaba que aquél había abandonado su propuesta porque era difícil de visualizar, pero estaba convencido de que dicha dificultad no llevaba necesariamente a renunciar a ella. Así Renninger escribía a Einstein:

Las razones que han llevado a de Broglie a abandonar de nuevo su idea de la “onda piloto” no me resultan claras. Parece que se basan más bien en las dificultades para imaginarla. Pues bien, por mi parte sostengo que la existencia real de las ondas piloto ha sido demostrada. Los hechos son lo primero, en segundo lugar aparecen las dificultades para explicarlos y éstas no pueden poner en tela de juicio los hechos¹⁰⁶²

Pero Renninger admite que la noción de “onda desprovista de energía” presenta dificultades conceptuales; por eso la califica de “inquietante”¹⁰⁶³; y si él la postula es tan solo para evitar males peores, puesto que no aceptarla llevaría a consecuencias que considera aún “menos atractivas”. Renninger manifiesta que puede verificar empíricamente la existencia de la onda durante todo el movimiento del fotón, por los apartados b) y c) de su experimento, pero sólo puede verificar la existencia de energía en dos puntos, el punto en el que se emite el fotón y el punto en el que se absorbe. Por ello, Renninger postula que hay una onda que, sin transportar ninguna partícula ni contener energía, avanza por uno de los caminos del interferómetro, aquel por el que no avanza el fotón, la partícula que contiene energía. Renninger justifica la existencia de esta onda, vacía y desprovista de energía, con el siguiente razonamiento al absurdo: si la onda no fuera vacía y fuera una onda electromagnética normal con energía “en el momento de la absorción se contraería a una velocidad superior a la de la luz y, además, a través de paredes cerradas. Tal supuesto sería completamente inaceptable”¹⁰⁶⁴.

Mas, si hay dificultad para aceptar la noción de onda vacía, esta dificultad aumenta cuando se tienen en cuenta las consecuencias de que las leyes de propagación de dicha onda sean las mismas que las de la onda electromagnética, como las leyes de refracción y las de dispersión. Entonces Renninger señala que estos fenómenos son manifestaciones de interacciones con la materia y, por esta razón,

¹⁰⁶²Carta de Renninger del 30 de mayo de 1953

¹⁰⁶³M. Renninger, “On Wave-Particle Duality” (1953) (p 8). En la carta anteriormente citada Renninger también escribe que no está seguro si Einstein estará de acuerdo con su postulación de una onda sin energía.

¹⁰⁶⁴M. Renninger, “On Wave-Particle Duality”, (1953) (p.9)

especula que la dificultad de aceptar las ondas vacías podría ser “suavizada por la consideración de que también la materia debe tener ondas guía”, como sostiene de Broglie¹⁰⁶⁵. Así, Renninger sugiere el paralelismo entre su modelo y el de Broglie: “¿Se han de corresponder las ondas guía *desprovistas de energía* asociadas con la *radiación de energía* con las ondas guía *desprovistas de materia* asociadas con la *radiación de la materia*?”¹⁰⁶⁶. Y a continuación lanza una nueva cuestión, aludiendo a las famosas “entidades fantasmales”¹⁰⁶⁷ de la expresión irónica de Einstein: “Las interacciones entre estas entidades fantasmales han de co-determinar los hechos que resultan de las interacciones de *energía* entre pedazos de energía, es decir, de materia?”¹⁰⁶⁸. Así, con esta pregunta Renninger insinúa que los fenómenos observados surgen tanto de las interacciones de las partículas materiales como de las interacciones de las ondas que las acompañan. Y sintetiza su concepción en un enunciado que constituye una propuesta de imagen ontológica: Quizás hay “un mundo que no es directamente observable” –constituido por sus ondas vacías asociadas a la radiación y por las ondas asociadas a la materia postuladas de Broglie– detrás del mundo observable –constituido por la radiación y la materia–, guiado por el primero. Y, a continuación, Renninger, con espíritu realista, añade, refiriéndose a aquel mundo no observable: “un mundo la realidad del cual en el tiempo y en el espacio tridimensional puede experimentalmente probarse y que no existe sólo en forma de probabilidades abstractas”¹⁰⁶⁹. Como vemos de nuevo, Renninger no rechaza la interpretación estadística de Born; sin embargo, mantiene que también se puede ofrecer una interpretación realista de la onda.

Pero, además, aceptar la existencia de la onda vacía presenta otra dificultad: ¿qué le ocurre a dicha onda después de que el fotón es absorbido? Hemos visto que el fotón podía ser absorbido por un objeto colocado en uno de los brazos del interferómetro. Entonces se podría responder que la onda vacía, después de la absorción del fotón, llegaría a los detectores finales del dispositivo. Pero ¿y si éstos se quitan? En este caso el problema es más evidente: ¿dónde va la onda vacía? Renninger no puede responder a la cuestión de forma categórica, pero sugiere dos respuestas: la onda vacía se mueve hacia el infinito o desaparece. De las dos respuestas, la primera le parece la “más natural”, puesto que “evita la conclusión de la existencia de influencias que se propagan con velocidad infinita también a través de paredes cerradas, una conclusión que es inconcebible en el mundo

1065 Fue de Broglie quien tuvo la idea de introducir “la dualidad onda-corpúsculo para los electrones y los otros elementos de la materia”, según su propia expresión en *La physique quantique restera-t-elle indéterministe?* Librairie du bureau des longitudes, de l'École Polytechnique. Paris (1953) (p.5)

1066 M. Renninger, “On Wave-Particle Duality”, (1953). (p.9)

1067 N. Bohr, “Discussion with Einstein” en *Albert Einstein: philosopher-scientist*, Schilpp, *Ibid.* (p. 206)

1068 M. Renninger, “On Wave-Particle Duality”, (1953) (p.9)

1069 M. Renninger, “On Wave-Particle Duality”, (1953) (p.9)

físico”¹⁰⁷⁰.

Finalmente Renninger plantea la siguiente cuestión: ¿Qué le ocurre a la partícula cuando la onda se divide?, por ejemplo, en el divisor de haz (que puede ser un espejo parcialmente transparente) del interferómetro. La respuesta a esta cuestión reitera una de las tesis principales del artículo, puesto que el autor responde que la partícula sigue una sola de las componentes, con una probabilidad que es proporcional a la intensidad de esta onda componente, según la interpretación de Born. Y concluye con una visualización: dicha situación es comparable al comportamiento de una partícula que forme parte de un fluido que, al llegar a un punto, se divide.

5. “MEDIDAS LIBRES DE INTERACCIÓN”, EL ARTICULO DE RENNINGER (1960)

En 1960 Renninger publicó un artículo que trata directamente de las medidas sin interacción. Su título original es “Messungen ohne Störung des Messobjekts”¹⁰⁷¹, traducido como “Medidas libres de interacción”.

El objetivo del autor en este trabajo es mostrar por medio de un experimento mental que, en contra de la interpretación dominante¹⁰⁷², “existen procesos de medida que no afectan en absoluto al sistema medido”¹⁰⁷³. En estos procesos de medida, denominados medidas “negativas”, no hay ninguna interacción con el objeto, por tanto, no se da ninguna perturbación en su evolución; pero, como las medidas habituales, que podemos denominar medidas “positivas”, y que son las que perturban el sistema medido, las medidas “negativas” también provocan la reducción de la función de onda.

1070M.Renninger, “On Wave-Particle Duality”, (1953) (p.9)

1071Que traducido literalmente sería “Medidas que no perturban los objetos”

1072Que Renninger denomina “la opinión común” (p.1)

1073M.Renninger, “Interaction-free Measurements”, traducción de W.De Baere (p 1)

5.1 MARCO CONCEPTUAL

5.1.1 Frente a Bohr, Jordan y Heisenberg

Renninger escribe contra la concepción ortodoxa según la cual, por la relación de indeterminación de Heisenberg, “el efecto de las medidas sobre los sistemas objeto no puede hacerse arbitrariamente pequeño”¹⁰⁷⁴. Como muestra de los fundadores de la mecánica cuántica que defienden esta concepción, Renninger cita a Jordan que manifiesta que “es inevitable que cada acto de medida perturbe de manera no negligible el sistema objeto”¹⁰⁷⁵ y cita a Bohr que también mantiene reiteradamente esta tesis. Encontramos numerosas citas que la enuncian. Así pues, vemos que Bohr señala que, por la relación de Heisenberg, “cada observación introduce un elemento por completo nuevo e incontrolable, como consecuencia de la imposibilidad de despreciar la interacción con el instrumento de medida”¹⁰⁷⁶. También encontramos que Bohr insiste en que, al estimar las posibilidades de la medida, no podemos evitar el postulado cuántico y éste, que atribuye inevitablemente a todo proceso atómico una discontinuidad simbolizada por el *quantum* de acción de Planck, implica que “cualquier observación de fenómenos atómicos comporta una interacción con el agente de observación que no puede despreciarse”¹⁰⁷⁷.

Este punto de vista no sólo se dió en los albores de la mecánica cuántica, cuando se establecieron los fundamentos de esta teoría, sino que continuó hasta finales de los 50, entre los contemporáneos de Renninger. Así, Heisenberg en 1959 manifestaba que cuando realizamos una observación, nuestro objeto se pone en contacto con el resto del mundo y, por supuesto, también con el instrumento de medida, lo cual significa que la ecuación de movimiento de la función de onda contiene la influencia de la interacción con el aparato de medida y

Esta influencia introduce un nuevo elemento de incertidumbre, ya que el aparato de medida debe ser necesariamente descrito en términos de la física clásica; tal descripción contiene todas las incertidumbres propias de la estructura microscópica del instrumento [...] y puesto que el instrumento está conectado con el resto del mundo, contiene, de hecho, las incertidumbres de la estructura

1074M.Renniger, “Interaction-free Measurements”(1960) *Ibid.*(p 1)

1075P.Jordan, *Anschauliche Quantentheorie*, Berlin (1936) (p 307)

1076N.Bohr, “El postulado cuántico y el desarrollo reciente de la teoría atómica” (1927)en *La teoría atómica y la descripción de la Naturaleza*. Alianza Universidad.Madrid (1988) (p.112)

1077N.Bohr, “El postulado cuántico y el desarrollo reciente de la teoría atómica”, *Ibid.* (p.99)

microscópica del mundo entero¹⁰⁷⁸

Renninger también cita un artículo de Heisenberg, publicado en 1958¹⁰⁷⁹, escrito en conmemoración del centenario de Planck, en el que el autor reflexiona sobre las consecuencias filosóficas¹⁰⁸⁰ del descubrimiento de éste, cuya influencia no se limita a la física cuántica sino que alcanza los problemas filosóficos más abstractos, puesto que es un descubrimiento con el que se plantean cuestiones de carácter general, como los supuestos fundamentales de todas las ciencias naturales.

El descubrimiento de Planck ha tenido una repercusión comparable a la que tuvieron los *Principia* de Newton que, a comienzos de la edad moderna, dieron una respuesta aceptada durante los siglos posteriores a la cuestión de qué es la “comprensión” o “explicación” de la naturaleza. Los *Principia* dieron, por primera vez, la respuesta de que ésta es básicamente la descripción matemática de los fenómenos naturales. Y, según Heisenberg, el descubrimiento de Planck también ha tenido honda repercusión porque el “carácter no intuitivo¹⁰⁸¹ de la física atómica moderna se basa en último término en la existencia del cuanto de acción de Planck”¹⁰⁸². Vemos que Heisenberg, como Bohr, atribuía la imposibilidad de visualizar los procesos cuánticos a la inevitable, y nunca despreciable, interacción entre el dispositivo de observación y el objeto observado. Según Heisenberg, “las imágenes intuitivas con que aprehendemos las cosas de nuestra experiencia cotidiana sólo valen en un limitado campo de experiencia”¹⁰⁸³, no en el amplio campo de la mecánica cuántica cuyos procesos también pretendemos describir objetivamente.

La teoría cuántica se enfrenta de manera especial al problema de la descripción objetiva de los procesos físicos. Hay una gran diferencia entre la física cuántica y la física clásica, puesto que en la física clásica

la medición era el método para determinar hechos, es decir, circunstancias independientes de la medición. Estos hechos o procesos podían describirse matemáticamente, fijando así su nexo causal. Es

1078W.Heisenberg, *Física y filosofía*. Ediciones La Isla. Buenos Aires (1959) (p.38)

1079W.Heisenberg, “El descubrimiento de Planck y las cuestiones filosóficas fundamentales de la teoría atómica” en W.Heisenberg, *Los nuevos fundamentos de la ciencia*, Editorial Norte y Sur, Madrid (1962)

1080Llama la atención el carácter filosófico de este artículo de Heisenberg que cita Renninger. Ello constituye una muestra más del contexto filosófico en el que nacieron los experimentos mentales de las medidas sin interacción.

1081Vemos que Heisenberg acepta que la física cuántica no es ni puede ser intuitiva, supuesto que, en cambio, no acepta Renninger, como vimos que no aceptaba tampoco Schrödinger.

1082W.Heisenberg, El descubrimiento de Planck...*Ibid.*(p154)

1083W.Heisenberg, El descubrimiento de Planck...*Ibid.* (p158)

cierto que en la teoría cuántica, la medición misma todavía es también una circunstancia objetiva, como en la física precedente, pero el deducir, partiendo de la medición, el desarrollo objetivo del proceso atómico que hay que medir se vuelve problemático, toda vez que la medición influye en el proceso y ya no se deja separar por completo del proceso mismo [...] Ya no podemos concebir los fenómenos naturales que se operan en los dominios de lo atómico del mismo modo que los procesos que se desarrollan macroscópicamente. Si empleamos los conceptos habituales, su aplicabilidad queda restringida por las llamadas “relaciones de incertidumbre”¹⁰⁸⁴.

Así pues, en la teoría cuántica es problemático deducir a partir de la medición el desarrollo objetivo del proceso atómico que se pretende medir, puesto que toda medición interviene en el proceso y no se puede separar de dicho proceso. Resulta, pues, imposible una descripción intuitiva de los procesos atómicos como la que ofrece la física clásica, que describe procesos macroscópicos. No podemos aplicar los conceptos habituales, porque estamos limitados por las relaciones de indeterminación. Son estas relaciones las que, en mecánica cuántica, hacen significativa la interferencia, la intervención, y “toda medición realizada en los dominios de lo atómico exige un acto, una intervención”¹⁰⁸⁵. Contra este último enunciado está dirigido el experimento mental que Renninger publicó en 1960.

5.1.2.El principio de neguentropía de Brillouin

Renninger también se dirige contra las tesis expuestas por Brillouin en un artículo¹⁰⁸⁶ que apareció en 1959¹⁰⁸⁷ en el que el autor insiste en el hecho de que la observación siempre contiene errores ineludibles, cuya trascendencia es fundamental debido a las relaciones de indeterminación de Heisenberg; así, por ejemplo, es imposible medir exacta y simultáneamente una coordenada x y su momento p_x , debido a la relación

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq h$$

1084W.Heisenberg,El descubrimiento de Planck...*Ibid.* ((158)

1085W.Heisenberg, El descubrimiento de Planck...*Ibid.* (p 161)

1086L.Brillouin, Information theory and its applications to fundamental problems in Physics, *Nature,Lond.* **183**, 501 (1959)

1087L.Brillouin(1889-1969) es considerado el fundador de la física de estado sólido moderna. Entre las aportaciones que realizó destacan las “zonas de Brillouin”. Aplicó la teoría de la información a la física y acuñó el término neguentropía.

Si un sistema físico está completamente aislado y no es perturbado no se le puede observar, puesto que la observación requiere un emparejamiento temporal entre el sistema y el instrumento de medida y este emparejamiento provoca una perturbación del sistema observado. Así, es un hecho inevitable que una observación siempre crea una perturbación, que a su vez comporta un aumento de entropía. Por tanto, “una observación es un proceso irreversible que implica un incremento de entropía en el aparato de medida”¹⁰⁸⁸

Brillouin propone una formulación precisa de esta idea a través de una ley que denomina “principio de neguentropía de la información”. Este principio enuncia que una observación ofrece una cierta cantidad de información ΔI y que esta información puede ser medida cuantitativamente y puede ser comparada con un inevitable incremento de la entropía ΔS en el aparato durante las medidas experimentales. Así, el resultado neto es:

$$\Delta S \geq \Delta I \text{ o } \Delta I + \Delta N \leq 0$$

$$\text{con } \Delta N = -\Delta S$$

llamando a ΔN neguentropía, por *neg(ative) entropia*, entropía negativa

Estas condiciones significan que una cantidad finita de energía ΔE ha de degradarse y cambiarse en calor de forma que

$$\Delta E = T\Delta S \geq T\Delta I \text{ (siendo } T \text{ la temperatura absoluta)}$$

Definiendo ΔI con la ecuación $\Delta I = k \ln P_0 / P_1$

y siendo

P_0 : el número de casos igualmente posibles antes de la medida

1088L.Brillouin, *Ibid.*(p.502)

P_1 :el número de casos igualmente posibles después de la observación

k :la constante de Boltzmann.

Según la definición de ΔI , si la precisión es muy elevada, entonces P_1 es muy pequeño y la cantidad de información ΔI es muy grande. Así, una precisión infinita, con un error infinitamente pequeño, significaría un incremento infinito de información; por tanto, una infinita cantidad de energía ΔE sería degradada, lo cual es imposible. Esta conclusión tiene, según Brillouin, fundamentales implicaciones filosóficas¹⁰⁸⁹, puesto que afecta a la imagen que la ciencia natural ofrece del mundo.

Entonces el autor alude a un trabajo filosófico¹⁰⁹⁰ de Schrödinger, *La Naturaleza y los griegos*, que presenta la imagen del mundo que ofrece la ciencia natural como una herencia del pensamiento griego. Uno de los supuestos fundamentales de esta imagen es, como hemos visto¹⁰⁹¹, que el científico, como todo ser humano, asume la existencia de un mundo real y objetivo, gobernado por precisas leyes matemáticas, un mundo que permanece imperturbado, tanto si es observado como si no lo es.

Pero, según Brillouin, este punto de vista es ingenuo, porque cuando no hacemos una observación no conocemos lo que está ocurriendo y cuando hacemos una observación perturbamos el “mundo exterior” por la inevitable relación que se da entre el sujeto observador y el objeto observado. Por consiguiente, concluye Brillouin, “la asunción de las leyes exactas es gratuita. Es un credo filosófico, no avalado por los hechos empíricos”¹⁰⁹². Lo único que podemos comprobar es la existencia de ciertas correlaciones¹⁰⁹³: si un determinado experimento presenta un determinado resultado podemos predecir, dentro de ciertos límites, el resultado posible de otro experimento posterior. Tampoco ello requiere de la existencia de ningún mundo exterior objetivo. La existencia de un mundo real objetivo es un modelo conveniente en los experimentos del mundo macroscópico,

1089 Como vemos, este artículo de Brillouin también presenta un contenido notablemente filosófico, lo que constituye otra muestra del contexto filosófico en el Renninger pensó su experimentos sobre medidas libres de interacción

1090 *La Naturaleza y los griegos*, cuyas tesis están expuestas en el apartado 10 del capítulo dedicado al pensamiento de Schrödinger

1091 La inteligibilidad y la objetividad que la ciencia atribuye al mundo, según Schrödinger, son estudiadas en el apartado “La imagen del mundo que ofrece la ciencia natural” del capítulo dedicado a este autor en este trabajo.

1092 L.Brillouin, *Ibid.* (p.502)

1093 Como Mach, Brillouin piensa que sólo se pueden establecer correlaciones entre hechos observados. Ver final del apartado 7 del capítulo dedicado al pensamiento de Schrödinger de este trabajo.

pero no es adecuado en los del mundo subatómico¹⁰⁹⁴.

La inevitabilidad de la perturbación en el objeto observado lleva a Brillouin a mantener que la causalidad estricta puede ser substituida en muchos casos por el probabilismo. Depende de la creencia de cada científico. Es un tema metafísico en el que los experimentos nada pueden aportar¹⁰⁹⁵. Pero, según Brillouin, el principio de indeterminación de Heisenberg y su principio de neguentropía hacen que el determinismo no sea realista, es decir, imposibilitan la acción del demonio de Laplace, que se supone que conocería las posiciones y las velocidades de todos los átomos del universo y calcularía exactamente la posterior evolución de todo el mundo. Así, según el principio de Brillouin, para medir con precisión las condiciones iniciales y las velocidades de todos los átomos del universo, el demonio necesitaría una cantidad infinita de energía, lo cual es irrealizable. Por tanto, según Brillouin, “la exacta determinación de las condiciones iniciales es así físicamente imposible”.

No obstante, en contra de lo que mantienen Bohr, Jordan, Heisenberg y Brillouin, existen unas medidas en las que no se da ninguna interacción con el objeto y, en consecuencia, estas medidas no alteran el objeto. Estas medidas consisten¹⁰⁹⁶ “en la observación experimental de la ausencia de posibles resultados” y por ello se denominan observaciones “negativas”. Para explicar el significado de estas observaciones “negativas” Renninger presenta, como ejemplo de ellas, el siguiente experimento mental.

5.2. EL EXPERIMENTO

Veamos en qué consiste dicho experimento. Desde un punto P en $t = 0$ se emite un fotón. Dicho punto P se encuentra rodeado por una pantalla S_1 que tiene la forma de un casquete esférico de radio R_1 que deja libre un ángulo Ω , de forma que el casquete se extiende en un ángulo $4\pi - \Omega$. Además la pantalla S_1 está rodeada por otra pantalla S_2 que tiene forma de esfera completa de radio R_2 , que subtende un ángulo 4π .

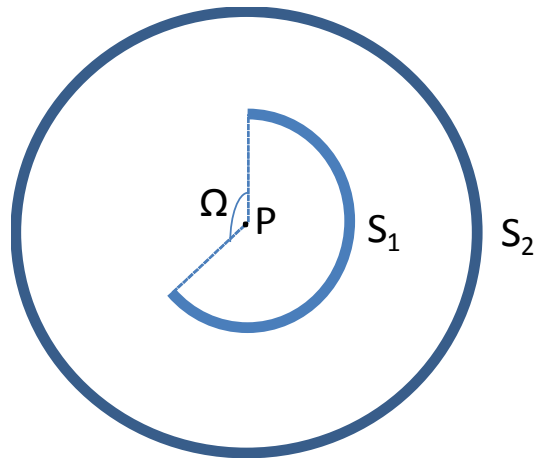
1094 Esta conclusión positivista a la que llega Brillouin no sería aceptada por Einstein, Schrödinger ni Renninger

1095 En este punto Brillouin coincide con Schrödinger (ver el apartado de la conclusión del capítulo de Schrödinger).

Por otra parte, Renninger no tiene el ambicioso objetivo de demostrar experimentalmente la validez del determinismo pero sí que hemos visto en el artículo de 1953 tenía el objetivo de demostrar la existencia de la onda como realidad física, es decir, como entidad en la cual se puede causalmente influir con una actuación experimental

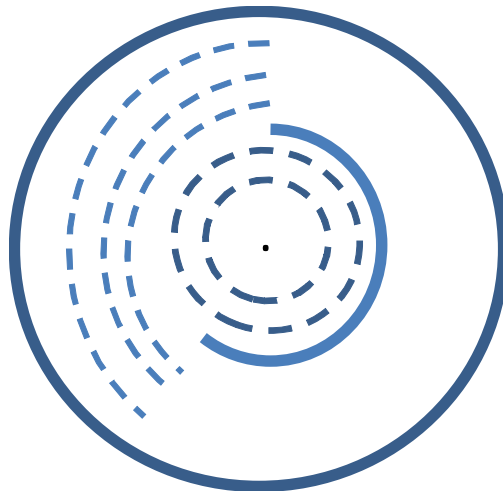
1096 M. Renninger (1960) (p. 1)

La geometría del montaje puede representarse con la siguiente figura:



(Fig. 5.1)

La onda del fotón puede representarse esquemáticamente con esta otra figura:



(Fig. 5.2)

La función de onda del fotón está determinada por las condiciones iniciales y los límites definidos anteriormente. Así, en el interior de S_1 es una onda esférica; en el exterior toma una forma más complicada. Pero, aún sin conocer esta forma, las predicciones para las probabilidades W_1 y W_2 de observar el fotón en S_1 y S_2 son, respectivamente:

$$W_1 = (4\pi - \Omega) / 4\pi$$

$$W_2 = \Omega / 4\pi$$

Para verificar esta predicción sólo hay que observar lo que ocurre cuando se emite una gran cantidad de fotones. Entonces el número de registros en la pantalla S_1 y S_2 es proporcional a W_1 y W_2 .

Es obvio que un posible registro de un fotón en S_1 ocurrirá antes que en S_2 . Si en $t_1 = R_1/c$ se observa un destello, en S_1 se da una “reducción de la función de onda” y entonces la probabilidad de que el fotón en un momento posterior $t_2 = R_2/c$ incida en S_2 (que antes de la observación en S_1 era $\Omega/4\pi$) se convierte instantáneamente en 0. Esta es la situación típica, la que habitualmente se observa, en la que ha habido intervención en el proceso físico: después de que el fotón sea absorbido en la pantalla S_1 , el estado no es el mismo que antes de la absorción.

Pero Renninger quiere llamar la atención sobre la otra situación posible: que el fotón no sea absorbido por S_1 . También entonces hay “reducción de la función de onda”. Así, cuando en $t = R_1/c$ no se ha encontrado el fotón en S_1 , entonces la probabilidad de encontrarlo en S_2 cambia instantáneamente al valor 1. Es decir, cuando¹⁰⁹⁷ “el fotón no es observado en S_1 entonces se moverá con seguridad hacia S_2 ”¹⁰⁹⁸. O sea, “Si en $t = R_1/c$ no se ha observado ningún destello en S_1 , el paquete de ondas del fotón, que antes de t_1 era una superposición de dos componentes, uno asociado al choque con S_1 y el otro asociado al choque con S_2 , se resuelve para el segundo componente incluso antes (es decir, para $t_1 < t < t_2$) de que el fotón llegue a S_2 en t_2 . Por consiguiente, vemos que se hace la predicción sobre el sistema objeto basándose en “una observación que no intervino en la evolución física, es decir, en una observación 'negativa’”¹⁰⁹⁹.

La existencia de tal observación sin interacción (*störungsfreien Beobachtungen*) prueba que no está justificado mantener que sea necesario que cada proceso de medida influya en el sistema objeto. Dicha observación sin perturbación demuestra que no existe la supuesta necesidad natural de interferencia de cada medida con el objeto. De esta observación sin perturbación Renninger deriva

1097M.Renninger, (1960) *Ibid.* (p 2)

1098M. Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, *Ibid.* (p.496).

1099M.Renninger, (1960) *Ibid.* (p 2)

la invalidez de la justificación que la interpretación de Copenhague ofrece de las relaciones de indeterminación de Heisenberg, puesto que dicha justificación se basa en la supuesta inevitabilidad de la interacción entre el dispositivo y el objeto. Cabe destacar que Renninger no niega las relaciones de indeterminación, que vemos que utiliza en el desarrollo de sus dos trabajos. Tan solo niega la justificación que habitualmente se ha ofrecido de éstas y propone sustituirla por una nueva justificación, que consiste¹¹⁰⁰ en la constante influencia que sobre el objeto ejerce toda la materia, tanto la que se encuentra cerca como la que se encuentra lejos de éste, independientemente de si forma parte del proceso de medida o no. Vemos que esta justificación es consistente con su descubrimiento, pero Renninger no profundiza en ella. Sólo la deja apuntada.

Por otra parte, Renninger manifiesta que en discusiones privadas se le ha presentado la objeción de que la *existencia* de la barrera S_1 , es decir, la *posibilidad* de realizar una observación, equivale a ejercer una influencia sobre el sistema objeto. Ante esta crítica, él responde que “ posibilidad de observación” y “observación real” son dos nociones muy diferentes y que la reducción de la función de onda ocurre sólo cuando realmente se realiza la observación.¹¹⁰¹

Y concluye Renninger sintetizando que “un proceso de medida, tanto si es 'positivo' como 'negativo', significa siempre una inequívoca 'reducción de la función de onda’” y, utilizando nociones de L.Brillouin, manifiesta que “cada observación genuina, cada incremento de información, reduce la función de onda. Y vice versa: cada reducción de la función de onda es el resultado de un incremento de información”¹¹⁰², tanto si ha habido interacción, como ocurre en un proceso de medida positivo como si no ha habido interacción, como ocurre en un proceso de medida negativo.

5.3 LA RESPUESTA DE HEISENBERG

Heisenberg había leído el trabajo de Renninger antes de su publicación y, habiéndole éste pedido su opinión, le respondió que la tesis de la interpretación de Copenhague según la cual es inevitable que en el proceso de medida haya una interferencia con el objeto no se refiere a que el conocimiento

1100M.Renninger, (1960) (p.1)

1101Como diría L. de Broglie, “¿Cómo imaginar, en efecto, que una posibilidad que no se realiza pueda tener tal efecto?”, *Étude critique des bases de l'interprétation actuelle de la Mécanique Ondulatoire.*, Gauthier-Villars&C^{ie} Éditeur. París (1963), (p.32)

1102M.Renninger , (1960) (p 2)

posterior de la medida reduzca de forma retroactiva el proceso de medida. Lo que significa es que la existencia del aparato de medida ya constituye interferencia¹¹⁰³ –que es la objeción a que anteriormente aludía Renninger–. Es decir, según Heisenberg, la posibilidad de interferencia ya constituye una interferencia¹¹⁰⁴, puesto que si no hubiera posibilidad de que el fotón chocara con la primera pantalla –por ejemplo, porque no existiera esta primera pantalla– no habría reducción de la onda:

Lo que significa la interferencia inevitable del proceso físico por la medida es ya la posibilidad de una medida, es decir, la existencia del aparato de medida. Es precisamente esta existencia la que provoca una interacción en parte indeterminada entre el aparato de medida y el sistema objeto y la que, después de realizar el experimento, lleva a la relación de indeterminación¹¹⁰⁵.

Por otra parte, Heisenberg mantiene también que “el acto de registrar un resultado, que lleva a la reducción de la función de onda, no es un proceso físico sino que es en cierto sentido un proceso matemático”¹¹⁰⁶, puesto que al repentino cambio de nuestro conocimiento corresponde un repentino cambio de la descripción matemática de nuestro conocimiento. La representación formal del vector de estado del fotón simboliza, en cada momento, nuestro conocimiento del estado del fotón: en el inicio sabemos que tiene dos componentes –que corresponden a dos posibilidades–, uno que representa el estado de chocar con la primera pantalla y otro que representa el estado de chocar con la segunda. Si no choca con la primera sabemos que chocará con la segunda.

Pero opina Renninger que la interpretación de Heisenberg no es la dominante; si lo fuera él no estaría en contra de ésta, puesto que básicamente las últimas consideraciones que ha manifestado Heisenberg también las comparte Renninger. Pero los seguidores de la escuela de Copenhague defienden explícitamente la inevitable interferencia producida por el proceso de medida y la imposibilidad de considerar el acto de la observación como “ser consciente de un hecho real *ya existente*”, según expresión de Jordan¹¹⁰⁷. Entonces Renninger manifiesta su propia interpretación.

1103 Opinión de Heisenberg explicada a Renninger en correspondencia privada y M.Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, *Ibid.* (p. 496)

1104 Esta posición recuerda, como veremos, la de Epstein en su artículo de 1945, trabajo que puede considerarse un precedente de este artículo de Renninger. Allí Epstein, al exponer esta propuesta manifiesta que es defendida por Bohr y la interpretación ortodoxa

1105 Opinión de Heisenberg comunicada en correspondencia personal a Renninger, sintetizada por éste, con el beneplácito de aquél, en el Epílogo del artículo de Renninger (1960)

1106 *Der Akt der Registrierung andererseits, der zur Zustandsreduktion führt, ist ja nicht ein physikalischer, sondern sozusagen ein mathematischer Vorgang*, extraído del resumen escrito por Renninger de la opinión de Heisenberg en el Epílogo del artículo

1107 *Von der Unmöglichkeit, den Beobachtungsakt “als bloßes Zurkenntnisnehmen eines sowieso vorhandenen*

Existe un propio proceso de medida como tal y el sujeto observador toma conciencia de este hecho que sin duda existe, de forma que su descripción tiene sólo una función aclaratoria. Hacerse consciente del hecho real que ocurre en el experimento es una “clarificación”, no es el hecho real mismo. Es un fenómeno mental producido por un fenómeno físico. Aquí es patente el realismo de Renninger.

Finalmente, concluye Renninger reiterando que no acepta la interpretación dominante según la cual es inevitable la interferencia entre el dispositivo de observación y el objeto observado, puesto que hay procesos de observación en que no aparece dicha interferencia, como revela su experimento.

5.4.EL PUNTO DE VISTA DE DE BROGLIE

5.4.1.Crítica general de de Broglie a la interpretación dominante

L.de Broglie dedicó un apartado de su obra *Étude critique des bases de l'interprétation actuelle de la Mécanique Ondulatoire*¹¹⁰⁸ al anterior experimento de Renninger¹¹⁰⁹, puesto que consideraba que una de las dificultades que la interpretación de Copenhague había de resolver era el experimento de resultado negativo¹¹¹⁰ de Renninger¹¹¹¹. El objetivo de la obra de de Broglie era juzgar esta interpretación dominante de la teoría cuántica y en el prefacio declaraba que aunque en un principio sus ideas habían sido diferentes a dicha interpretación, es decir, a la de Bohr y sus seguidores, posteriormente la había adoptado porque se adaptaba perfectamente al formalismo de la mecánica cuántica cuyas predicciones eran exactamente verificadas por la experiencia. Pero después había vuelto a sus concepciones primitivas. Así pues, de Broglie, que había aceptado durante tanto tiempo¹¹¹² la concepción ortodoxa dominante¹¹¹³, podía hacer una crítica desde dentro. Al escribir esta obra consideraba, como crítica general, que dicha interpretación, “cediendo a tendencias

Tatbestand anzusehen”. Epílogo del artículo de Renninger(1960)

1108L.de Broglie, *Étude critique des bases de l'interprétation actuelle de la Mécanique Ondulatoire*, Gauthier-Villars & C^{ie} Editeur, Paris (1963)

1109L.de Broglie, *Ibid.*(p.30)

1110De Broglie dedicó un apartado a estudiar el artículo que Renninger publicó en 1960 y calificó de “*très remarquable*” el que había publicado en 1953

1111De quien dice al principio del apartado que desde hacía unos años pretendía llevar a cabo en Alemania una campaña contra la interpretación usual

1112. 25 años, según nota a pie de página de M.Renniger, *Ibid.* (p.4)

1113Concepción dominante porque “Después de más de treinta años, los físicos teóricos se han reunido, en su gran mayoría, en una interpretación de la Física cuántica y de la Mecánica ondulatoria que deriva de las ideas introducidas no hace mucho por N.Bohr y los que le han seguido (Escuela de Copenhague)” De Broglie (1963) *Ibid.* (prefacio)

exageradamente abstractas había renunciado demasiado fácilmente a ofrecer una imagen inteligible de los fenómenos de la Física cuántica”¹¹¹⁴. Según de Broglie, la interpretación ortodoxa rechazaba las auténticas explicaciones y abusaba de “explicaciones puramente verbales” que le parecían demasiado contrarias “a los principios de un sano método científico”¹¹¹⁵; ejemplos de tales explicaciones puramente verbales constituían la noción de complementariedad y la afirmación de una “presencia potencial” de un corpúsculo en una región del espacio¹¹¹⁶.

Respecto al primer ejemplo, pensaba de Broglie que mantener que la onda y el corpúsculo son “aspectos complementarios” de la realidad física que se manifiestan en experiencias diferentes, de forma que cuando uno aparece el otro desaparece, no tiene carácter realmente explicativo. Consideraba que la noción de complementariedad es banal e imprecisa y no aporta ninguna explicación al problema de la unión de ondas y partículas. Así, según de Broglie, si tenemos una placa fotográfica sobre la cual aparecen franjas de interferencia, se manifiesta en la misma placa tanto el aspecto corpuscular como el ondulatorio; puesto que, por una parte, las franjas muestran el aspecto ondulatorio y, por otra, cada franja está formada por un conjunto de puntos, que manifiestan el carácter corpuscular de la realidad.¹¹¹⁷

Respecto al segundo ejemplo, según de Broglie, la expresión “presencia potencial” se presta a confusión, puesto que lleva a plantear la siguiente cuestión: “¿decir que el corpúsculo *puede* estar presente en todos los puntos de la onda significa que está en cada instante en un punto de la onda pero ignoramos cuál es este punto, o bien significa que el corpúsculo posee una misteriosa “omnipresencia” dentro de todo el tren de ondas?”¹¹¹⁸ A de Broglie le parecía que la mayoría de los defensores de la interpretación ortodoxa adoptaban el segundo significado, que consideraba completamente impreciso y, por esta razón, acientífico.

También de Broglie criticaba¹¹¹⁹ que la interpretación usual del formalismo fuera “puramente probabilista”¹¹²⁰ e impidiera *a priori* buscar una realidad tras las nociones matemáticas estadísticas. La interpretación puramente probabilista estaba inspirada, según de Broglie, en la filosofía

1114L.de Broglie,(1963) *Ibid.* (prefacio)

1115L.de Broglie, (1963) *Ibid.* (p. 25)

1116Alusión a la concepción de las potencialidades de Heisenberg

1117Recordemos que también Renninger(1953) dirigía su experimento contra la concepción según la cual “Es imposible que un único e indivisible acto experimental muestra tan bien uno y otro aspecto de la luz” (p3)

1118L. de Broglie, *Ibid.* (p 20)

1119Como lo hacía también Einstein

1120L.de Broglie, (1963) *Ibid.* (p 19)

positivista y basada en el supuesto de que “todo lo que no es observado no existe y no ha de ocupar un lugar en las teorías físicas”. Ante esta interpretación, de Broglie mantenía que si una imagen clara permitía comprender mejor lo que se observa, ésta se había de introducir en la teoría y recordaba que los mismos físicos que defendían una interpretación puramente estadística hablaban constantemente de realidades como los electrones, los núcleos o los átomos. Así pues, a todos nos es muy difícil no admitir “la existencia de una realidad física muy determinada, aún cuando no se la pueda observar”¹¹²¹

Encontramos a Renninger(1953) muy cerca de de Broglie¹¹²². Por una parte, defendía que se había de buscar imágenes mentales que ayudaran a comprender los fenómenos físicos, puesto que al principio de su artículo manifestaba que “la visualización no ha de abandonarse *demasiado* pronto sino que ha de mantenerse en la medida de lo posible”¹¹²³ y se posicionaba en contra de la postura según la cual se veía “la visualización, o incluso el simple deseo de ella como modestia rudimentaria e ingenua (naive)”¹¹²⁴. Renninger admitía que hay un límite a la visualización, puesto que no todos los fenómenos que estudia la física pueden visualizarse, es decir, pueden representarse con imágenes de objetos que hayamos visto previamente¹¹²⁵ pero no hemos de limitarnos más de lo necesario, es decir, no hemos de renunciar a posibles modelos visuales que sean “interesantes”, beneficiosos y útiles, si nos ayudan a entender los fenómenos que observamos. Precisamente el trabajo que presentaba en 1953 obedecía a este propósito, el de ofrecer una visualización, una imagen, que contribuyera a explicar, a hacernos comprender, el difícil problema de la doble naturaleza de la luz.

Por otra parte, hemos visto que Renninger también aceptaba la interpretación probabilista de la onda pero no se conformaba con adoptar sólo esta interpretación. Así, en su experimento pretendía poner de manifiesto que la onda asociada a la partícula es también una realidad física que se

1121L.de Broglie, (1963) *Ibid.* (p. 20)

1122 Hay diversas muestras de la cercanía intelectual que se da entre Renninger y de Broglie. He aquí dos de ellas. En su artículo de 1953(p.4) M.Renninger manifiesta que la imagen que él presenta, es decir, la imagen de que cada *quantum* consiste en una partícula de energía guiada por una onda sin energía, no es nueva sino que ya había sido formulada previamente por de Broglie en 1927. Por otra parte, M. Renniger, como había comunicado a Einstein en una de sus cartas, también había traducido al alemán y publicado los capítulos introductorios del trabajo de L. de Broglie titulado *La physique quantique restera-t-elle indéterministe?*

1123M.Renniger (1953), *Ibid.* (p. 2)

1124M.Renniger (1953), *Ibid.* (p. 2)

1125Aquí Renninger incide en uno de los problemas con los que encuentra la física atómica, puesto que esta ciencia intenta reproducir lo no intuible mediante imágenes de lo que es intuible, entendiendo por intuible lo que se puede describir después de haberse visto. Así, la física atómica se enfrenta al siguiente problema:” Es verdad que no se puede ver el átomo, pero ¿cuál sería su aspecto si se pudiera ver?” C.F. von Weizsäcker, *La imagen física del mundo*, Biblioteca de autores cristianos, Madrid (1974) (p. 21)

propaga en el espacio y el tiempo, es decir, no ha de considerarse tan solo “como una distribución de probabilidades”¹¹²⁶. Y esto Renninger lo probaba empíricamente, porque en su experimento se puede observar, con la introducción de láminas en los brazos del interferómetro que la onda “ puede ser influida en una región finita del espacio –!y sólo allí!--!y sólo en ese tiempo!”¹¹²⁷

5.4.2. Cuando la partícula no es siempre observable

Además de las dificultades generales expuestas, que según de Broglie sufría la interpretación ortodoxa, ésta también presentaba unas particulares dificultades que surgían de la hipótesis de que la partícula cuántica, aparte de sus manifestaciones observables, no está constantemente localizada en el espacio. Así, de Broglie, exponía una objeción presentada al respecto por Einstein y otra presentada por Schrödinger y afirmaba que ambas objeciones se podían expresar a través del siguiente argumento:

Supongamos una partícula que está en el interior de una caja B de paredes impermeables. Según la interpretación ortodoxa de la función de onda ψ , la partícula tiene una probabilidad $|\psi|^2$ de que se encuentre en cada punto de la caja. Supongamos que la caja se divide en dos partes separadas, B_1 y B_2 , y que son transportadas a dos lugares muy alejados como, por ejemplo, París y Tokio. Entonces la función de onda ψ consta de dos partes, según la fórmula $\psi = c_1\psi_1 + c_2\psi_2$ donde $|c_1|^2 + |c_2|^2 = 1$, de forma que ψ_1 representa que la partícula está localizada en B_1 y ψ_2 significa que está localizada en B_2 . Por consiguiente, en el caso de que en París se realizase un experimento que revelara la presencia de la partícula en B_1 la probabilidad de que este experimento presentara un resultado positivo sería $|c_1|^2$ y de que lo presentara negativo sería $|c_2|^2$.

Si efectivamente observamos que la partícula está en B_1 , es decir, si el experimento da un resultado positivo en París, según de Broglie, ello implica que, según la interpretación ortodoxa, la partícula estaba presente en el conjunto de las dos cajas antes de la observación y que, en el momento de la observación, se localizaba inmediatamente en la caja B_1 . En cambio, según la interpretación de de Broglie, el resultado positivo en París implica que la partícula ya estaba allí antes de la observación. Mas la descripción de la partícula dada por ψ no ofrece una descripción completa de la realidad, puesto que la partícula estaba situada en B_1 antes de que allí fuera observada pero ψ no daba

1126 M. Renninger (1953), *Ibid.* (p. 2)

1127 M. Renninger (1953), *Ibid.* (p. 7)

ninguna información sobre ello¹¹²⁸.

Según de Broglie, la interpretación ortodoxa lleva a consecuencias paradójicas en el caso de los experimentos con resultado negativo. Para comprenderlo supongamos que la partícula esté cargada y que en la caja B₂ de Tokio se haya instalado un dispositivo que permita localizar la partícula. Si no se observa nada estamos ante un experimento negativo. ¿Qué significa el experimento negativo? Que la partícula ya estaba en París antes de realizar el experimento en Tokio. No significa que el hecho de no haber observado nada en Tokio haga que la partícula esté situada dentro de una caja que se encuentra a una distancia de miles de kms., como, según de Broglie, sostiene la interpretación dominante, que, en este punto, es calificada de “absurda” por de Broglie, porque “¿Cómo podemos imaginar que el simple hecho de no haber observado *nada* en Tokio haya podido provocar la localización de la partícula a una distancia de muchos miles de millas?”¹¹²⁹

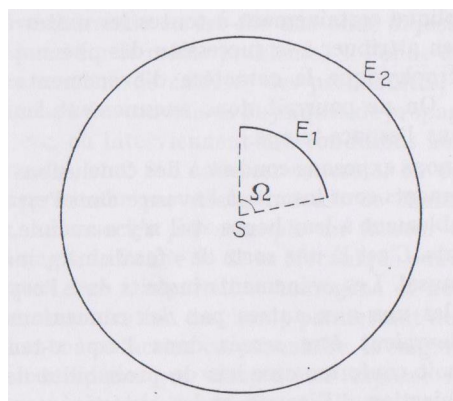
La consideración de este experimento mental lleva a de Broglie a presentar, también como objeción a la interpretación de Copenhague, un experimento paralelo, el experimento de resultado negativo de Renninger (1960).

5.4.3 Sobre el experimento de Renninger (1960)

De Broglie expone el experimento mental de Renninger y lo representa con la siguiente figura donde toma el ángulo Ω como el ángulo subtendido por la primera pantalla, cuando Renninger lo tomaba como el ángulo que quedaba fuera de la pantalla.

1128De lo cual de Broglie infiere, como EPR, que la función de onda ψ no ofrece una descripción completa de la realidad física

1129L.de Broglie (1963), *Ibid.* (p.29)



(Fig. 5.3)

Según de Broglie, la interpretación que ofrecía la escuela de Copenhague de este experimento era “paradójica” e “incomprensible”, puesto que cuando se da la reducción de la onda, cuando hay un cambio brusco de la amplitud de onda, es decir, cuando W_1 , la probabilidad de que el fotón incida sobre la pantalla 1, se hace nula y W_2 , la probabilidad de que incida sobre la pantalla 2, se convierte en la unidad, el sujeto no ha percibido nada. Así, “es imposible admitir que esta reducción sea debida a la toma de conciencia de un observador¹¹³⁰ que no ha observado nada, ni a un dispositivo, en este caso la pantalla E_1 , que no ha reaccionado de ninguna manera”¹¹³¹. Es decir, ante este experimento negativo, no se puede mantener que la conciencia del observador que no ha percibido nada ni la acción nula de un dispositivo que no ha hecho nada sean las responsables de la reducción.

Para de Broglie la situación es más clara si se interpreta con su propia teoría, es decir, si se admite que la fuente emite un corpúsculo que está estrechamente unido a una onda, con una posición definida en cada instante y, por tanto, con una trayectoria a lo largo del tiempo. Esta trayectoria está influida por la propagación de la onda. Así pues, todas las trayectorias son líneas rectas que salen de la fuente excepto aquellas que se encuentran en la vecindad inmediata de los bordes de la pantalla E_1 , puesto que la pantalla actúa como un obstáculo a la propagación de la onda y provoca en los bordes unos fenómenos de difracción que modifican la forma de las trayectorias. Así pues, las trayectorias que llegan a E_2 lo hacen o bien a través de un trayecto rectilíneo o bien a través de un trayecto alterado por la difracción en el borde de la pantalla E_1 . El número de trayectorias que llegan a E_1 es proporcional a W_1 y el número de trayectorias que llegan a E_2 es proporcional a W_2 . Si no

1130Vemos que aquí de Broglie alude a la explicación basada en el papel protagonista que von Neumann atribuía al observador en el acto de medida. Ver el apartado del problema de la medida de este capítulo

1131L. de Broglie(1963), *Ibid.* (p.31)

hay centelleo en E_1 en el intervalo de tiempo que necesita la onda para llegar a E_1 estamos seguros de que la trayectoria seguida por el corpúsculo no es una de las que conducen a E_1 . Entonces bruscamente $W_1 = 0$ y $W_2 = 1$. Este cambio traduce simplemente, según de Broglie, un cambio de estado de nuestro conocimiento sobre la trayectoria del corpúsculo. No hay ninguna incomprensible acción que la conciencia del observador ejerza sobre el corpúsculo, como sostiene la interpretación dominante al explicar la observación en general, porque en este caso el observador no ve ningún destello en la pantalla E_1 .

Finalmente de Broglie recuerda que Renninger había también considerado el caso del fenómeno de difracción al contemplar la posibilidad de que la pantalla E_1 fuera una esfera casi completa con un pequeño agujero. Entonces la porción de onda que pasaría por el agujero sufriría difracción y presentaría franjas de difracción en la pantalla E_2 .

6. EL EXPERIMENTO DE EPSTEIN, PRECEDENTE DE LOS EXPERIMENTOS DE RENNINGER

P.S.Epstein¹¹³², motivado por el artículo EPR, había dejado a un lado por un tiempo su trabajo más propiamente técnico y se había dedicado a estudiar el tema del concepto de realidad¹¹³³ en la física.. Fruto de sus reflexiones fue un artículo publicado en 1945 y titulado ¹¹³⁴ “El problema de la realidad en la mecánica cuántica”¹¹³⁵, en el que ilustra sus argumentos con un experimento mental¹¹³⁶ basado en la operación de un interferómetro que dispone de espejos móviles. Dicho experimento es en muchos aspectos similar¹¹³⁷ a los experimentos de Renninger.

1132Que realizó contribuciones significativas en mecánica cuántica, como la explicación del efecto Stark

1133M.Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, *Ibid.* (p.231)

1134P.S.Epstein, *The reality problem in quantum mechanics*, *American Journal of Physics*, **13**,127-136 (1945)

1135Recordemos que la noción de realidad física era esencial en el artículo que Renninger publicó en 1953, “Sobre la dualidad onda-partícula”

1136Lo cual constituye otra muestra del contexto filosófico en el que nacieron los experimentos IFM

1137M.Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, *Ibid.* (p.495)

6.1 EL PROBLEMA DE LA REALIDAD

Según Epstein, las nuevas concepciones de la mecánica cuántica (por ejemplo, las relaciones de indeterminación de Heisenberg) habían incrementado el intercambio de ideas que siempre había existido entre ciencia y filosofía. Por esta razón, muchos físicos habían escrito libros y artículos filosóficos¹¹³⁸. Y uno de los temas que en ellos más se había estudiado era el problema de la realidad, que forma parte tanto de la filosofía como de la física, porque esta ciencia natural "trata de la interpretación de los datos de la observación física"¹¹³⁹. Éste es también el tema del artículo de Epstein.

Empieza Epstein formulando el problema mediante la siguiente cuestión: ¿cuál es el estatus de las cosas del mundo cuando éstas no son percibidas? Las respuestas de los filósofos modernos a esta pregunta se encuentran en dos posiciones extremas:

Por una parte, los dualistas piensan que las cosas "tienen una realidad más allá de la mente que observa e *independiente de ella*", es decir, "el mundo físico externo y el observador son dos dominios separados", pero también suponen que entre estos dos dominios hay una correlación tal que las percepciones de la mente que observa las cosas son interpretadas como impresiones de las cosas que existen realmente en el mundo exterior. Esta concepción es muy cercana al "realismo ingenuo" (*naive*)¹¹⁴⁰ del pensamiento habitual.

Por otra parte, los fenomenologistas o sensacionalistas niegan que el objeto percibido y el sujeto perceptor existan de forma separada. Para ellos todas las sensaciones están en el mismo nivel, tanto las sensaciones del mundo exterior como las percepciones internas del sujeto (por ejemplo, las fantasías), ya que todas forman la conciencia. Realmente no hay distinción entre el mundo percibido y el mundo que existe en sí. La forma extrema de esta concepción es el solipsismo, según el cual sólo es real el mundo individual del sí mismo, del yo.

1138Según M.Jammer Epstein fue estimulado a escribir su artículo por el artículo escrito por A.Einstein *Física y realidad* (1936) (p.231)

1139P.S.Epstein, *The Reality Problem in Quantum Mechanics* (1945) ,*Ibid.* (p.127)

1140Es la actitud de la persona sencilla, no cultivada, para la cual la realidad es lo que siente y percibe; esta persona no duda de la existencia real de las cosas que le rodean. Si conoce experiencias que revelan que una percepción es errónea, como se da en el caso de las ilusiones ópticas, las considera una excepción. La mayoría de los físicos son realistas *naive* que no se preocupan por sutilezas filosóficas, según M.Born en *Physics in my generation*, The English Universities Press Limited London. Springer-Verlag.New York (1969), (p. 132-135)

Pero estas concepciones filosóficas del problema de la realidad no satisfacen al físico, quien desea aplicar las consideraciones generales a las cuestiones concretas que investiga. Así, el físico se pregunta las siguientes cuestiones: ¿son los datos observacionales que he acumulado en mi investigación de tal naturaleza que pueden interpretarse como las percepciones de un mundo exterior completamente independiente del observador?, es decir, ¿es sostenible la visión extrema dualista?

El mundo con el que el físico más ha de tratar es el mundo de las medidas físicas, que Epstein denomina “el mundo del observador”, puesto que el científico no sólo trata con percepciones obtenidas directamente a través de sus órganos sensoriales sino que incrementa y refina el poder de estos órganos gracias a los instrumentos científicos.

Si el observador es dualista interpreta sus observaciones como las manifestaciones de un mundo que existe más allá de sí mismo y de sus propios instrumentos y que continuaría existiendo incluso si nadie lo observara. En cambio, si es fenomenologista reconoce sólo la existencia del mundo observado y evita mencionar cualquier realidad más allá de éste. Las dos respuestas son posibles, porque son consistentes; pero hay una cuestión que, según Epstein, nos permite decidir entre ellas: ¿cuál es la que mejor se adapta a la descripción lógica de las observaciones científicas acumuladas?

¹¹⁴¹Utilizando este criterio, el problema de la realidad deja de ser un problema puramente especulativo.

El formalismo de la mecánica cuántica –que se ha desarrollado para explicar los datos observacionales-- está basado en un dualismo *modificado*, puesto que una parte de este formalismo consiste en ecuaciones a las cuales se supone que la naturaleza está sujeta, en cuanto no es observada, y otra parte de este formalismo se refiere a las perturbaciones que se introducen por la inevitable interferencia del observador con la naturaleza. Epstein lo denomina dualismo *modificado* porque no es como el realismo ingenuo en que el mundo del observador es una réplica del mundo no observado sino que es diferente por “las modificaciones introducidas por el proceso de medida”¹¹⁴².

¹¹⁴¹Vimos que éste es también el punto de vista de Einstein y de Schrödinger. El criterio para escoger una concepción metafísica u otra es práctico. Es mejor la concepción metafísica que es más fructífera para la ciencia.

¹¹⁴²P.S.Epstein(1945), *Ibid.* (p.132)

Así, la incompleta correspondencia entre el mundo observado y el mundo no observado implica la consecuencia de que la concepción dualista no resuelve el problema de la realidad, puesto que, mientras se acepta que el mundo continua existiendo cuando no se lo observa, permanece la pregunta de cuáles son las propiedades exactas de este mundo no observado. Por ejemplo, ciertos complejos de observaciones que siempre se presentan juntas¹¹⁴³ los denominamos “electrones” y otros los llamamos “protones”. Se acepta que electrones y protones existen también en el período comprendido entre observación y observación. Pero el problema es cómo describirlos en el espacio y el tiempo. Las posiciones y los momentos de electrones y protones se les llama sus *observables*. Las relaciones de indeterminación de Heisenberg imponen restricciones a estos observables, porque posición y momento no pueden ser simultánea y exactamente medidos. Si uno de los dos –posición o momento– es observado, el otro permanece inobservado¹¹⁴⁴. A estas cantidades inobservadas, como la posición y el momento, que pueden atribuirse a electrones y protones cuando no se los observa se las denomina *inobservables*. De esta manera, el problema de la realidad se hace más concreto y se resume en la cuestión de si puede atribuirse realidad a los inobservables, significando con ello “si es posible construir enunciados significativos sobre ellos”¹¹⁴⁵. Entonces el problema de la realidad es simplemente un problema de física¹¹⁴⁶, que puede ser resuelto con métodos físicos.

6.2 EL EXPERIMENTO MENTAL DE EPSTEIN

A continuación, Epstein pasa del dominio de la especulación abstracta al de la investigación empírica de problemas concretos, disponiéndose a analizar ejemplos de inobservables que no tienen realidad según “los criterios de la teoría cuántica”¹¹⁴⁷. El primer ejemplo es la situación mencionada, es decir, aquella en que cuando el momento de una partícula es exactamente conocido entonces su coordenada de posición no tiene realidad física¹¹⁴⁸, porque no se puede averiguar experimentalmente cuál es.

El segundo ejemplo lo califica como un caso “muy instructivo descrito en la mayoría de libros de texto de dinámica cuántica”¹¹⁴⁹. En él se concentra Epstein. Es el siguiente experimento.

1143Aquí vemos que Epstein sigue una epistemología machiana, como Schrödinger.

1144En el sentido de que no tiene la posibilidad de ser medido con exactitud.

1145P.S.Epstein(1945), *Ibid.* (p.132)

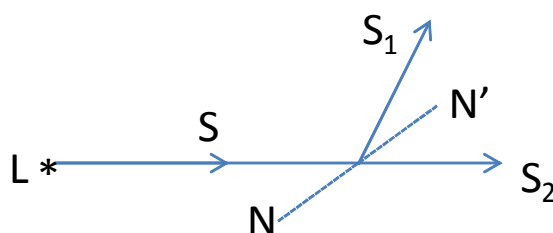
1146Como para EPR y para Renninger(1953)

1147P.S.Epstein(1945), *Ibid.* (p.132)

1148Rememorando literalmente a EPR(1935).

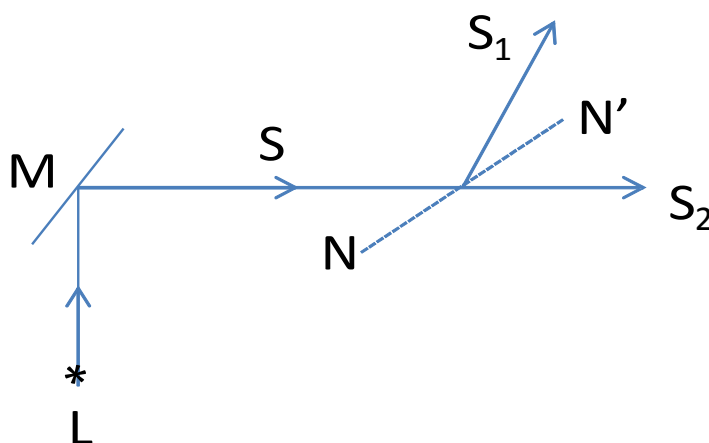
1149Y Epstein aquí cita el mismo libro y el mismo capítulo que Renninger(1953), el primer capítulo de *The principles of quantum mechanics* de P.A.M. Dirac, que constituyó la 1ª exposición completa del formalismo de la mecánica

Una onda S sale de la fuente L y llega a una lámina semiplataada NN' . Allí se divide en dos ondas S_1 y S_2 , que son coherentes, es decir, que cuando se recombinan muestran interferencia, como se representa en la figura inferior:



(Fig 6.1)

La anterior descripción se ha realizado desde el punto de vista de la onda. Pero ¿qué descripción se puede ofrecer desde el punto de vista del fotón? Para responder a esta pregunta disminuimos la intensidad hasta el punto de que los fotones se siguen unos a otros a grandes distancias – y así tratamos cada vez con un solo fotón – e insertamos en el trayecto de la luz un espejo móvil M , cuyo retroceso bajo el impacto del fotón indica la presencia de dicho fotón.



(Fig. 6.2)

cuántica y estaba presentada de forma axiomática y basada en las nociones de “observables” y “estados” como primitivas. Esta obra causó gran impacto entre los físicos de la época y M. Jammer recoge una nota en la que uno de ellos se referían a esta obra como su “biblia”. M. Jammer, *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, Tomash Publishers (1989)(p.389)

Si la intensidad es tan baja que los fotones se encuentran muy alejados entre sí, hemos visto que podemos tener un solo fotón cada vez¹¹⁵⁰ y ello nos lleva a preguntarnos la siguiente cuestión: ¿cómo se explica la interferencia entonces? La respuesta es: considerando que “cada fotón interfiere sólo consigo mismo”¹¹⁵¹

Si designamos por ψ_1 el estado del fotón que pertenece al haz S_1 y por ψ_2 el estado del fotón que pertenece al haz S_2 , por el principio de superposición de la mecánica cuántica¹¹⁵², el estado del fotón antes de llegar al espejo móvil es:

$$\Psi = c_1 \psi_1 + c_2 \psi_2$$

$$|c_1|^2 + |c_2|^2 = 1$$

siendo c_1 y c_2 constantes cuyos valores absolutos elevados al cuadrado representan las probabilidades de que el fotón se encuentre en el haz S_1 o en el haz S_2 .

En nuestro caso, como el fotón tiene las mismas posibilidades de ir por un camino que por el otro, es:

1150Según Dirac, cuando el haz está constituido por un único fotón y nos preguntamos qué ocurrirá al fotón cuando éste atraviese el interferómetro se manifiesta claramente el conflicto entre las teorías ondulatoria y corpuscular de la luz.

Así pues, tenemos que considerar que el fotón está parcialmente en cada una de las dos componentes en que se divide el haz. Entonces se producen interferencias al superponerse ambos haces, lo cual muestra la naturaleza ondulatoria de la luz. Pero si se realiza una observación, por ejemplo, reflejando el haz sobre un espejo móvil y observando si retrocede o no, entonces se muestra la naturaleza corpuscular de la luz. Habrá un cambio brusco en el estado del fotón. Es como si obligáramos al fotón a estar enteramente en uno de los haces. Y ya no se producirá interferencia entre los dos haces. El otro haz ya no interviene para nada en la descripción del fotón

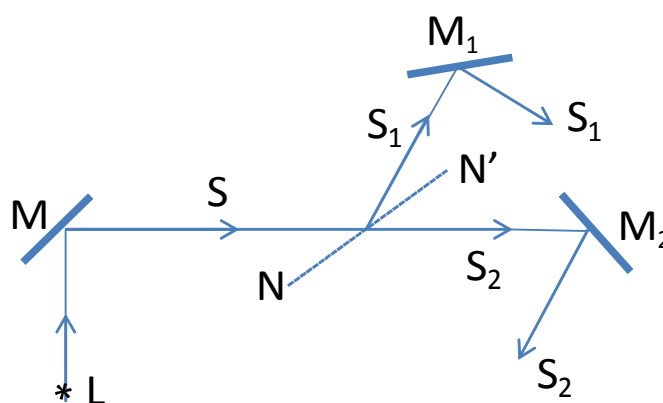
La reconciliación entre la teoría ondulatoria y la corpuscular se basa en asociar cada estado de traslación del fotón con una de las funciones de onda de la óptica ondulatoria ordinaria. La interpretación de dicha asociación para Dirac sólo puede tener una naturaleza estadística, “en la que la función de onda nos da información acerca de la probabilidad de encontrar el fotón en cualquier lugar determinado al realizar una observación de su posición”, *Ibid.* (p.22)

1151Como manifiesta Renninger(1953) en p.5, citando a Dirac en *Ibid.* (p.23)

1152Según Dirac, apartarse del determinismo de la teoría clásica significó una considerable complicación en la descripción de los fenómenos naturales. Esta complicación queda compensada por la gran significación que ofrece el principio de superposición de estados, según el cual cuando un sistema está en un estado se puede considerar que está parcialmente en cada uno de una serie de estados, lo que es inconcebible desde un punto de vista clásico, porque, desde la perspectiva clásica, no es posible imaginar que un sistema esté parcialmente en cada uno de varios estados y que esto sea equivalente a estar en otro estado distinto. *Ibid.* (p.25)

$$|c_1|^2 = |c_2|^2 = \frac{1}{2}$$

A continuación, Epstein modifica las condiciones del experimento interponiendo en el trayecto de cada haz, S_1 y S_2 , un espejo móvil, M_1 y M_2 , respectivamente



(Fig. 6.3)

Cuando el espejo M_1 retrocede estamos seguros de que el fotón se encuentra en el haz S_1 . Entonces su estado es $\psi = \psi_1$. Así pues, la observación del fotón por medio del espejo móvil ha tenido como consecuencia su repentino cambio de estado

Desde el punto de vista de la descripción del fotón, el estado de éste ha cambiado bruscamente de $c_1 \psi_1 + c_2 \psi_2$ a ψ_1 . Desde el punto de vista de la descripción de la onda, las ondas S_1 y S_2 instantáneamente se han hecho incoherentes –porque, como el fotón se encuentra enteramente en el haz S_1 y no se halla en el haz S_2 – el fotón no puede interferir más consigo mismo. Por consiguiente, podemos concluir que el espejo ha provocado una alteración del movimiento de la onda y “una razón suficiente para la transición de estado”¹¹⁵³. Obviamente, las mismas consideraciones se pueden aplicar cuando es M_2 el espejo que se mueve. Entonces estamos seguros de que el fotón se encuentra en S_2 y su estado salta a ψ_2 .

A continuación, Epstein va a adaptar las reflexiones abstractas que había expresado en un principio

¹¹⁵³P.S.Epstein(1945), *Ibid.* (p.133)

a su experimento en el interferómetro.

Hemos visto que el estado del sistema es descrito como $\psi = \psi_1 + \psi_2$ en dos casos:

- 1) cuando no hay espejos móviles interpuestos en S_1 y S_2 , como se ve en la figura 1
- 2) cuando hay espejos móviles, pero aún no ha transcurrido el tiempo necesario para que el fotón llegue a ellos, a M_1 o M_2 , como se ve en la figura 3.

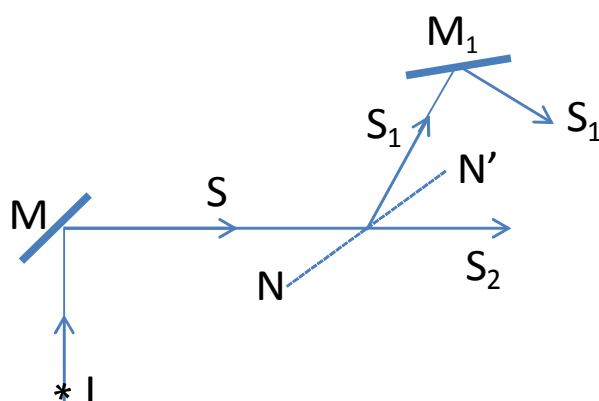
Bajo estas condiciones, la localización del fotón en el haz S_1 o S_2 es interpretada como un inobservable porque no hay manera de decidir en cuál de los dos haces se encuentra el fotón. Hasta que no haya una observación que cambie, repentina y discontinuamente, el estado del sistema, es decir, hasta que no observemos el retroceso de uno de los espejos, “la localización del fotón en un haz o el otro *no tiene realidad*”¹¹⁵⁴.

Según Epstein, “la discusión más interesante referida al problema de la realidad de los observables fue iniciada”¹¹⁵⁵ por EPR¹¹⁵⁶, que mantenían que la descripción cuántica no es completa. Epstein utiliza un ejemplo diferente al de EPR pero con él pretende explicar la naturaleza de las mismas dificultades presentadas por EPR. Para ello, Epstein considera un interferómetro como el de la figura 5.3 pero sin el espejo móvil M_2 .

1154 Expresión de Epstein(1945) (p.134) que nos recuerda de nuevo a EPR y Renninger(1953)

1155 P.S.Epstein, *Ibid.* (p.134)

1156 Recordemos que EPR consideran el ejemplo de una partícula que tiene un único grado de libertad. Según la teoría cuántica, cuando se obtiene un valor definido del momento p no se puede determinar el valor de la coordenada x . Recordemos también que EPR habían adoptado como criterio suficiente de realidad el siguiente: si, sin perturbar, podemos predecir con seguridad el valor de una cantidad física, entonces allí existe un elemento de la realidad física correspondiente a esta cantidad física. Por dicho criterio, se concluiría que “cuando se conoce el momento de una partícula entonces su coordenada no tiene realidad física”.



(Fig. 6.4)

En este dispositivo si M_1 retrocede estamos seguros de que el fotón se encuentra en el haz S_1 y su estado salta a $\psi = \psi_1$. Pero si no retrocede en un tiempo razonable, después de que M haya retrocedido, concluimos que el fotón no está en S_1 sino en S_2 ¹¹⁵⁷; entonces su estado salta a $\psi = \psi_2$.

Este ejemplo lleva a Epstein al siguiente dilema¹¹⁵⁸:

- 1) o hemos de aceptar que el sistema sufre un repentino cambio de estado sin ser inducido a ello por ningún cambio físico¹¹⁵⁹, lo cual va contra el principio de razón suficiente¹¹⁶⁰, puesto que no hay razón para dicho repentino cambio de estado
- 2) o la razón por la cual el fotón penetra en S_2 ha de estar contenida en la descripción de su estado inicial. Por tanto, las ecuaciones

$$\psi = c_1\psi_1 + c_2\psi_2 \qquad |c_1|^2 = |c_2|^2 = \frac{1}{2}$$

1157Esta conclusión se establece de la misma manera que en los IFM de Renninger(1960) y de Elitzur y Vaidman(1993)

1158Que el mismo Epstein declara que es paralelo al dilema de EPR

1159Renninger(1960) diría sin observación y sin perturbación, porque el espejo móvil M_1 realiza la misma función que la primera pantalla del experimento de Renninger (1960). Así pues, si el espejo no se mueve o la primera pantalla no detecta la incidencia del fotón, es que se cumple la segunda posibilidad, es decir, que el fotón va por el otro brazo del interferómetro o incide con la segunda pantalla.

1160Epstein alude reiteradamente al principio de razón suficiente, según el cual nada acontece sin que haya una razón que explique por qué acontece, entendiendo “razón” como fundamento que muestre por qué algo es como es y no de otro modo. Según Leibniz, el principio de razón suficiente es, junto al principio de contradicción, uno de los dos principios básicos en que se apoyan nuestros razonamientos, puesto que pensamos que “Nada acontece sin razón”. J.Ferrater Mora, *Diccionario de Filosofía*, Edit. Ariel (Barcelona) (2005) (p 3004)

“que niegan realidad a la localización del fotón en cada haz son inadecuadas”¹¹⁶¹.

Recordemos que EPR concluían que la descripción ofrecida por la teoría cuántica no es completa. En cambio, Bohr, en su respuesta a EPR, no aceptaba la conclusión de éstos. Aplicada al ejemplo de Epstein, la respuesta de Bohr significaba que aunque el espejo no retrocediera había que tener en cuenta el hecho de que fuera capaz de hacerlo¹¹⁶².

El hecho fundamental del que surgen las dificultades es que la falta de respuesta del espejo móvil – es decir, lo que posteriormente se denominará “experimento de resultado negativo”– nos da la seguridad de que el fotón ha pasado por el otro camino. Es decir, estamos seguros de que si hubiéramos colocado un espejo móvil en el otro paso este segundo espejo hubiera retrocedido. Pero lo que hubiera podido ocurrir no suele interesar a los físicos, declara Epstein, que evitan estos enunciados porque “huelen a metafísica”¹¹⁶³. No obstante, el ejemplo del interferómetro permite experimentos que los físicos no pueden ignorar¹¹⁶⁴, puesto que en ellos las consideraciones abstractas quedan materializadas en observaciones empíricas concretas.

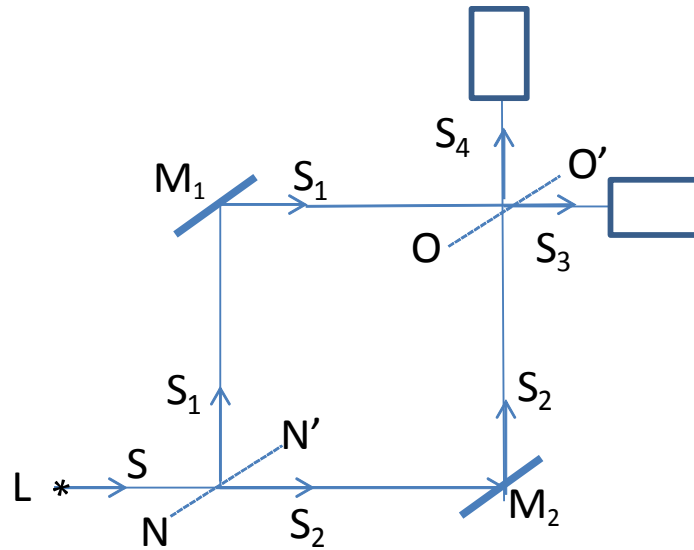
Así, veremos observaciones diferentes si al interferómetro que teníamos le quitamos el primer espejo M y le añadimos una segunda lámina semiplatedada OO', que también actúa como divisor de haz. Al final el fotón sale de OO' en uno de los haces S_3 o S_4 , según la siguiente figura:

1161P.S.Epstein (1945), *Ibid.* (p.134)

1162Ver el epílogo del artículo de Renninger (1960) donde el debate entre éste y Heisenberg rememora esta respuesta de Bohr a EPR. Simplemente la existencia del espejo móvil, aunque permanezca inmóvil, es ya significativa. Si el espejo retrocede es que el fotón ha llegado hasta él. Si no se mueve es que no ha llegado hasta él porque ha ido por el otro camino. Por consiguiente, según Heisenberg, la posibilidad de interferencia ya constituye por sí misma una interferencia.

1163P.S.Epstein(1945), *Ibid.* (p.135)

1164El interferómetro permite experimentos en que se pueden realizar observaciones sobre las distintas posibilidades de lo que hubiera podido ocurrir, es decir, sobre enunciados contrafácticos. Lo hemos visto en los experimentos de Renninger y lo veremos en el de Elitzur y Vaidman y en otros IFM



(Fig.6.5)

Con este interferómetro realizamos las siguientes observaciones:

1ª) Si los dos espejos M_1 y M_2 se mantienen fijos, entonces los dos haces S_1 y S_2 son coherentes y se da interferencia constructiva en S_3 e interferencia destructiva en S_4 . Por tanto, cada fotón del interferómetro sale por S_3 .

2ª) Si los dos espejos M_1 y M_2 son móviles, entonces uno de ellos retrocede ante el impacto del fotón. En el retroceso se pierde la coherencia de los dos haces y, por tanto, no se produce interferencia en OO' . En consecuencia, cada fotón que llega a OO' tiene igual probabilidad de salir por S_3 como por S_4 y los fotones emergentes se observan distribuidos por igual en S_3 y en S_4 .

3ª) Si el espejo M_2 es fijo y el M_1 es móvil, entonces pueden darse dos situaciones:

A) La primera es que M_1 retroceda; entonces se produce, en el momento del retroceso, un cambio de estado (con pérdida de coherencia) y sabemos con seguridad que el fotón pasa a través de S_1 .

B) La segunda situación es que M_1 no retroceda; entonces sabemos con seguridad que el fotón que sale del interferómetro ha pasado a través de S_2 .

Así llegamos a un dilema planteado por los resultados de nuestras observaciones anteriores, la observación 1ª y la 3ª B. En la 1ª observación los fotones están en S_1 y en S_2 ; y, por tanto, el vector de estado de cada fotón es $c_1\psi_1+c_2\psi_2$. En cambio, en la 3ª B los fotones están sólo en S_2 . Por tanto, el vector de estado de cada fotón es ψ_2 . Pero no tendría que haber habido ningún cambio de estado, porque no se ha observado ningún retroceso. Según EPR, si la descripción ofrecida por la teoría cuántica fuera completa el estado sería el mismo. Mas no lo es.

Según Bohr y la interpretación ortodoxa de la teoría cuántica, aunque en la observación 3ª B, el espejo no retroceda, también se da un brusco cambio de estado, porque hay la posibilidad de que el espejo se mueva y no se ha movido, lo cual hace esta observación completamente diferente de la 1ª, en la que el espejo no se mueve porque está fijo. Por tanto, la simple posibilidad es significativa, como mantenía Bohr¹¹⁶⁵. Para argumentar la posición de Bohr, Epstein describe el proceso del experimento de la siguiente manera¹¹⁶⁶:

Regresemos al interferómetro de la figura 5 con los dos espejos fijos. Entonces los estados ψ_1 y ψ_2 , que corresponden a la localización del fotón en los haces S_1 y S_2 , son equivalentes; por tanto, el fotón tiene en ambas ramas la misma energía, es decir, es un sistema degenerado, puesto que un sistema que posee dos diferentes estados con la misma energía es degenerado.

En este sentido el fotón en el interferómetro con los espejos fijos constituye un sistema degenerado. Pero hacer que un espejo se pueda mover equivale a realizar una perturbación del sistema que resuelve la degeneración. Mas ello no es debido a ninguna misteriosa acción a distancia. Es simplemente debido a un proceso que se puede describir así: cuando el fotón está en el primer divisor de haz NN' no hay criterio para decir que las dos ramas no son equivalentes. Por tanto, el fotón sale como una onda doblemente degenerada perteneciente a las dos ramas y descrita por la fórmula $\psi = c_1\psi_1+c_2\psi_2$. Pero “cuando la onda se acerca más y más a los espejos la falta de equivalencia debida a la movilidad de uno de los espejos se hace sentir más y más”¹¹⁶⁷. Llega un

1165Así, Bohr, en el artículo de respuesta a EPR, describe el experimento en que una partícula atraviesa un pequeño agujero en un diafragma que forma parte de un dispositivo experimental. Si el diafragma está unido rígidamente al soporte entonces no hay ninguna posibilidad de conocer el momento intercambiado entre la partícula y el diafragma, puesto que dicho momento ha pasado al soporte. En cambio, si el diafragma no está unido rígidamente al soporte entonces se da la posibilidad de conocerlo, pero entonces no se da la posibilidad de conocer la posición de la partícula al pasar por el agujero, puesto que hay un desplazamiento incontrolable del diafragma durante la colisión.

1166Pero Epstein admite que no puede dar una “detallada descripción de lo que está realmente ocurriendo”, *Ibid.* (p.136)

1167 P.S.Epstein, (1945) *Ibid.*(p 136)

momento en que la descripción anterior ya no es más adecuada y se ha de resolver la degeneración, es decir, el estado ha de cambiar a uno de los dos estados no degenerados, $\psi = \psi_1$ o $\psi = \psi_2$. Así pues, el cambio no ocurre sin razón suficiente.

En conclusión, este ejemplo muestra a Epstein, como a Bohr, que la simple posibilidad de una medida puede ser una razón suficiente para un repentino cambio de estado, incluso aunque no se produzca una alteración física del sistema. Así pues, concluye Epstein reconociendo que la crítica de EPR ha contribuido a clarificar las concepciones de la teoría cuántica pero no ha terminado con ellas. Especialmente, EPR no consiguieron probar que "los inobservables tuvieran más realidad de la que la teoría cuántica les atribuye", según expresión de Epstein.

6.3 RELACIÓN ENTRE EL ARTÍCULO DE EPSTEIN (1945) Y LOS DE RENNINGER (1953 Y 1960)

Vemos que el esquema del interferómetro de Epstein de la figura 5 es como el de Renninger(1953); cuando los espejos son fijos, el dispositivo de Renninger y el de Epstein son idénticos; entonces el experimento en el interferómetro muestra la naturaleza ondulatoria de la luz, puesto que hay interferencia constructiva en una de las salidas e interferencia destructiva en la otra; por esta razón, todos los fotones salen por el mismo lugar; la única diferencia entre los dos dispositivos es que en el de Epstein los espejos tienen la posibilidad de moverse. Así pues, los objetos, como, por ejemplo, las pantallas opacas, que actúan como detectores en el dispositivo de Renninger y por ello indican el paso de los fotones por una de las dos ramas, se corresponden en el dispositivo de Epstein con los espejos móviles que, al retroceder cuando impacta un fotón sobre ellos, también desempeñan la función de detectar el paso de los fotones por una de las dos ramas.

Así, el experimento de Epstein utiliza un interferómetro como el de Renninger(1953) pero es de resultado negativo como el de Renninger (1960). Tanto en Epstein como en Renninger(1960) la ausencia de observación lleva a la reducción de la función de onda:

En Epstein el hecho de que el espejo móvil no retroceda significa el cambio de estado del fotón, porque indica con seguridad que el fotón va por la otra rama. En Renninger(1960) la ausencia de destello en la primera pantalla lleva también al cambio de estado del fotón porque indica con

seguridad que éste incidirá sobre la segunda pantalla.

En conjunto, los experimentos de Epstein(1945) y Renninger (1953 y 1960) tienen en común el objetivo de responder a preguntas abstractas sobre los fundamentos de la teoría cuántica a través de experimentos mentales que muestran situaciones empíricas concretas. Así, Epstein pretende responder a la cuestión de si puede atribuirse realidad a los inobservables y Renninger(1953) se propone responder a la pregunta de si existen realmente, no sólo como simple instrumento matemático, las ondas asociadas a las partículas y Renninger (1960) responde a la pregunta de si existen procesos de medida que no afectan al sistema medido.

Los tres trabajos se encuentran en la línea de EPR, que pretende responder con un experimento mental a la pregunta de si la mecánica cuántica es una teoría completa. El legado de EPR es claramente visible en ellos; especialmente en Renninger (1953) que, para demostrar sus tesis, utiliza una noción de "realidad física" muy cercana a la noción de "elemento de la realidad" de EPR y en Epstein, que también trata el problema de la realidad de los inobservables; pero Epstein no llega a la conclusión de EPR, puesto que manifiesta que EPR no han conseguido probar que los inobservables tienen más realidad de la que la cuántica les atribuye. En su conclusión Epstein acepta la visión de Bohr¹¹⁶⁸, para quien la posibilidad de una medida puede ser razón suficiente para un repentino cambio de estado, aunque no se observe ninguna perturbación del sistema. Precisamente, Heisenberg respondía a Renninger (1960) con la misma idea: la posibilidad de una medida significa ya una interferencia inevitable.

Así pues, vemos que se encontraban completamente entrelazadas las preguntas y las respuestas que sobre los fundamentos de la mecánica cuántica expresaban los diferentes autores de la época.

¹¹⁶⁸Que, como hemos visto, Heisenberg manifiesta, en la respuesta a Renninger(1960), que es la concepción de la interpretación de Copenhague.

Por otra parte, según Epstein, esta visión se desprende del artículo que Bohr escribió contra EPR

7. POSIBLES INTERPRETACIONES DE LOS EXPERIMENTOS DE RENNINGER

7.1 ¿CÓMO INTERPRETARÍA BOHR LOS EXPERIMENTOS DE RENNINGER?

El experimento de 1953:

Sobre la visualización

Ante todo, Bohr no hubiera aprobado el propósito manifestado explícitamente por Renninger de presentar una visualización de los procesos que muestran la doble naturaleza de la luz, puesto que, según Bohr, las imágenes visuales, que son adecuadas para entender el mundo macroscópico, no se pueden aplicar al mundo atómico, debido al hecho de que el *quantum* de acción h impone a cada proceso atómico una discontinuidad que no aparece en el mundo macroscópico y los modelos visuales están contruidos sobre el supuesto de continuidad propio de la física clásica.

Así, según Bohr, los físicos que se dedicaban a estudiar los fenómenos cuánticos no habían de buscar modelos visuales que representaran las características de dichos fenómenos, puesto que la teoría cuántica no podía explicar la naturaleza real de los procesos cuánticos, sólo podía ofrecer las leyes estadísticas que los regían. En cambio, los presupuestos realistas de Renninger, como a Einstein, no le permitían aceptar esta limitación.

¿Un solo experimento o distintos experimentos?

El tema del artículo de Renninger(1953) es uno de los temas que más interesó a Bohr. La naturaleza dual de la luz hemos visto que es omnipresente en sus escritos. Constituye también su ejemplo más frecuente de complementariedad, puesto que Bohr reitera una y otra vez que el aspecto de onda y el de partícula son dos modelos necesarios para entender la naturaleza de la luz, pero sólo son aplicables en circunstancias experimentales excluyentes

Por esta razón, cuando Renninger mantenía que “en una única e indivisible intervención experimental se revelan los dos aspectos de la naturaleza de la luz”¹¹⁶⁹, Bohr diría que Renninger

1169M.Renninger, (1953)*Ibid.* (p. 7)

realmente realizaba distintas intervenciones en su experimento, puesto que él preparaba el interferómetro de formas diferentes, ya que:

1) Cuando no se interponía ningún objeto en los brazos del interferómetro, cada fotón se detectaba en el detector final D_1 y ninguno en D_2 , lo cual mostraba que en D_1 se manifestaba la interferencia constructiva de la onda del fotón consigo misma y en D_2 se manifestaba la interferencia destructiva. Así pues, en esta situación se mostraba el aspecto ondulatorio de la luz.

2) Cuando se interponía una lámina completamente transparente en un brazo del interferómetro se cambiaba totalmente el modelo anterior, puesto que cada fotón se detectaba en D_2 y ninguno en D_1 . Este cambio se debía al hecho de que la lámina provocaba un cambio de fase de $\lambda/2$ en la onda, lo cual alteraba radicalmente el patrón de interferencia.

3) Cuando se interponía un objeto absorbente en uno de los brazos del interferómetro había una probabilidad de $\frac{1}{2}$ de que el fotón fuera absorbido, es decir, detectado por dicho objeto. Si era absorbido entonces no se percibía ningún otro efecto en el detector D_1 ni en el D_2 . Este hecho revelaba el aspecto corpuscular de la luz.

Así pues, según Bohr, aunque el experimento consistía en enviar fotones por un único interferómetro, se realizaban distintas intervenciones, como constituyen el hecho de interponer la lámina que provoca el cambio de fase en la onda del fotón y el hecho de interponer el objeto que lo puede absorber. Bohr las interpretaría como diferentes actuaciones experimentales, es decir, distintos experimentos.

Mas Renniger le respondería con la siguiente consideración: “el resultado de insertar la lámina prueba la naturaleza ondulatoria, la observación en un único punto prueba la naturaleza de partícula de uno y el mismo fotón”¹¹⁷⁰; puesto que la lámina genera un cambio de fase en la onda que provoca un cambio de patrón de interferencia en los detectores finales y ello muestra la naturaleza ondulatoria de la luz; pero en el primer detector, es decir, en el objeto que absorbe el fotón, se percibe éste a través de un solo punto, y ello muestra la naturaleza corpuscular de la luz.

1170M.Renniger,(1953) *Ibid.* (p.7)

Pero esto nos lleva al problema del significado de la onda y la pregunta que Bohr podría plantear a Renninger es la siguiente: ¿cómo espera éste “ver” la onda que considera realidad física? ¿cómo un objeto macroscópico de los que vemos habitualmente en nuestra vida cotidiana? Bohr le argumentaría que la onda no se puede “ver” porque no es una realidad física sino que tan solo constituye un modelo que hace inteligibles algunos fenómenos que percibimos, como los destellos en los detectores finales del interferómetro –ya que el interferómetro reproduce el modelo del experimento de la doble rendija¹¹⁷¹–. En el experimento de Renninger, como en el de la doble rendija, las ondas son, según Bohr, sólo un modelo que nos ayuda a entender lo que percibimos, los destellos luminosos. En este famoso experimento vemos que las bandas brillantes del patrón de interferencia que se observan en la placa fotográfica están constituidas por la acumulación de puntos luminosos y la distribución de estos puntos obedece las leyes de la mecánica de ondas. Y esto ocurre incluso con rayos tan débiles como aquellos que están constituidos por un único fotón. En palabras de Bohr :

Con rayos intensos, este patrón es construido por la acumulación de un gran número de procesos individuales, que cada uno da lugar a un pequeño punto en la placa fotográfica, y la distribución de estos puntos sigue una simple ley derivable del análisis ondulatorio. La misma distribución se debe encontrar en la explicación estadística de muchos experimentos realizados con haces tan débiles que en una sola exposición sólo un electrón (o fotón) llegue a la lámina fotográfica.

Renninger hemos visto que aceptaba esta interpretación estadística de la onda, pero no como única interpretación, puesto que creía poder establecer también una interpretación ontológica.

La noción de causa

Bohr no hubiera aceptado del artículo de Renninger de 1953 el papel fundamental que en él se otorgaba a la noción de causa. Hemos visto que Renninger pretendía establecer una interpretación ontológica de la onda; para él, la onda asociada a la partícula era una realidad física, no sólo un modelo que representaba una distribución estadística, y definía la realidad física como la entidad en la cual se puede influir causalmente a través de las acciones del experimentador.

¹¹⁷¹Ver este experimento al principio de la introducción

Según Bohr la noción de causa no se podía utilizar de forma adecuada¹¹⁷² porque el *quantum* de acción h introducía el indeterminismo en los procesos cuánticos. Así pues, en la observación y en la medida cuántica la perturbación producida en el objeto observado por la interacción entre objeto y aparato impedía definir de manera inequívoca el estado del objeto y su evolución posterior, es decir, impedía utilizar la noción de causalidad en sentido ordinario –el sentido en que la utilizaba Renninger–. Así pues, en palabras de Bohr :

la magnitud de la perturbación causada por la medida no puede ser determinada, ya que la limitación considerada afecta a toda aplicación de los conceptos mecánicos y, por consiguiente, se aplica tanto a los instrumentos de observación como a los fenómenos investigados¹¹⁷³.

Ello es debido al hecho de que en la interacción entre el instrumento de observación y el sistema observado, como en toda interacción, hay un intercambio de energía que nunca es nulo y, debido a las dimensiones del mundo atómico, no puede despreciarse. Así, no se puede realizar la descripción causal en el sentido habitual de la física clásica porque, hablando propiamente, la interacción con el instrumento de medida hace imposible definir el estado del sistema en un instante mediante magnitudes medibles y predecir su estado en cualquier momento posterior.

Así, Bohr tampoco aprobaría que Renninger uniera descripción causal y descripción espaciotemporal para justificar la realidad física de la onda al establecer éste, en el resumen inicial de su artículo, que “cuando esta realidad es considerada en un espacio particular durante un tiempo particular” probaría que “esta realidad ha sido causalmente influida por el acto experimental en este espacio y ese tiempo”. Según Bohr, la descripción causal y la descripción espaciotemporal, de las cuales habitualmente forma parte la observación¹¹⁷⁴ en física clásica, eran incompatibles puesto que, por las relaciones de Heisenberg, no se pueden usar exacta y simultáneamente los conceptos de espacio y tiempo y las leyes de la conservación de la energía y de la cantidad de movimiento, que son propias de la descripción causal. Así, para Bohr, descripción causal y descripción espaciotemporal eran excluyentes y complementarias. Lo expresaba con las siguientes palabras:

Esta indeterminación [la que enuncia Heisenberg] presenta, verdaderamente, un particular carácter

1172 Ver el apartado 6.2 del capítulo de Bohr de este trabajo

1173 N. Bohr, *La teoría atómica y la descripción de la Naturaleza*. *Ibid.* (p. 60)

1174 Bohr manifiesta que la descripción en el espacio y en el tiempo y el principio de causalidad “ simbolizan respectivamente las posibilidades ideales de observación y de definición” *La teoría atómica y la descripción de la Naturaleza* (p.100)

complementario que impide todo uso simultáneo de los conceptos de espacio y de tiempo y de las leyes de conservación de la energía y de la cantidad de movimiento, característico de la descripción causal de la mecánica¹¹⁷⁵

Así, según Bohr, su noción de complementariedad ayudaba a paliar las inquietudes que producían las extrañas características que presenta el mundo atómico, como la dualidad onda-partícula y la incompatibilidad de la descripción causal y la espaciotemporal. La noción de complementariedad era tan rica para Bohr que permitía incluso compensarnos de la pérdida que significaba el abandono del principio de causalidad. Dicho principio podía ser adecuado para explicar experimentos de procesos clásicos, pero no de procesos cuánticos, como los que realiza Renninger

La onda como realidad física

Mas sobre todo, según Bohr, tampoco sería adecuado considerar que la onda que acompaña la partícula es una realidad física puesto que, para él la onda era sólo un concepto, del que surgía un modelo que era conveniente aplicar en determinadas situaciones particulares para relacionar los fenómenos que se observaban. La onda era un instrumento matemático para expresar las leyes estadísticas de los procesos cuánticos. No era nada más.

Así, el hecho de no tener ningún objeto interpuesto en el interferómetro Mach-Zehnder se relaciona con el destello en el detector final D_1 y el hecho de insertar una lámina transparente en un brazo del interferómetro se relaciona con el fenómeno del destello en el otro detector final D_2 . Este cambio se interpreta como cambio radical del patrón de interferencia de las ondas, que a su vez se interpreta como cambio de situación de las partículas que son un constituyente de la luz. Vemos que cuando el modelo ondulatorio ya no constituye un recurso útil para explicar los fenómenos se deja al margen y se adopta el complementario, el corpuscular. Así también, cuando se introduce en un brazo del interferómetro un detector, la detección se produce en uno solo de los brazos. Entonces no se observa centelleo en ninguno de los dos detectores finales. Se interpreta que la partícula ha sido absorbida por el objeto que se ha encontrado en su trayecto, es decir, vemos de nuevo que se adopta el modelo corpuscular.

1175N.Bohr, *La teoría atómica y la descripción de la Naturaleza*”, *Ibid.* (p.60)

Por otra parte, Bohr consideraba¹¹⁷⁶ que la hipótesis de de Broglie no se refería a ningún proceso que ocurriera en la naturaleza. Simplemente era una hipótesis formal, a la cual sólo daba una interpretación simbólica, no realista. Lo mismo diría de la de Renninger(1953), puesto que el mismo Renninger reconocía que su imagen de que cada sistema cuántico consistía en una partícula con energía guiada por una onda sin energía no era nueva sino que ya había sido formulada por de Broglie en 1927¹¹⁷⁷.

No obstante, encontramos también textos de Bohr que muestran, según Folse y Murdoch, presupuestos realistas¹¹⁷⁸ y que le acercarían a Renninger. Bohr reflexionaba sobre los mismos temas en momentos muy diferentes y con argumentos muy diferentes. Así se puede ver que Bohr presuponía que el científico pretende describir objetivamente los fenómenos de la naturaleza y la misma noción de complementariedad se basaba en un supuesto realista porque Bohr manifestaba que dos descripciones eran complementarias en el sentido de que correspondían al mismo objeto que, al interactuar con diferentes instrumentos de medida, presentaban fenómenos complementarios, aunque manifestaba que era difícil dotar de significado a la cuestión de qué es lo que existe tras los fenómenos. Este fondo impreciso de realismo débil en Bohr le acercaba a Einstein, su principal oponente en el debate que les enfrentó toda la vida.

La "onda vacía"

Finalmente, hay otro punto de contacto entre Bohr y Renninger. Aquel vería con interés la noción de Renninger(1953) que De Baere denomina "onda vacía"¹¹⁷⁹, que es la onda que, sin energía, se desplaza por el brazo del interferómetro por el cual no se propaga la partícula. Así, Bohr¹¹⁸⁰ en el artículo BKS¹¹⁸¹ también postula la existencia de una onda vacía, que no es portadora de energía, que es una onda virtual. En dicho trabajo se establece la hipótesis de que el átomo está constituido por un conjunto de osciladores armónicos virtuales y se supone que los diferentes átomos se comunican entre sí por medio de un campo de radiación virtual producido por estos osciladores. Este campo virtual produce en el átomo transiciones espontáneas entre estados estacionarios y el

1176 Apartado 6.1.3 del capítulo dedicado a Bohr en este trabajo

1177M.Renninger (1953), *Ibid.* (p.4)

1178Apartado 10 del capítulo dedicado a Bohr en este trabajo

1179W.De Baere, "Renninger's Thought Experiment..."(2005), *Ibid.* (p.3)

1180Ver apartado 6.1.2 del capítulo dedicado a Bohr de este trabajo

1181N.Bohr, H.A.Kramers y J.C.Slater, The Quantum Theory of Radiation en *Sources of Quantum Mechanics*. Edit. B.L.van der Waerden, Dover Publications. N.York (2007)

campo virtual de los otros átomos provoca transiciones inducidas en dicho átomo.

El experimento de 1960:

Podemos decir que Bohr no contempla la posibilidad de que haya medidas de sistemas cuánticos sin interferencia, porque manifiesta reiteradamente¹¹⁸² que toda medida implica una interacción no despreciable, puesto que el intercambio de energía que se da en ella ocurre sólo a través de transferencias discretas de una magnitud que en mecánica cuántica nunca es desdeñable.

Incluso en las medidas en que, en apariencia, no hay interacción, como en el experimento de Renninger (1960) interpretaría Bohr que también se da interferencia, porque la simple posibilidad de que haya interacción ya constituye una interacción¹¹⁸³. Así, el hecho de que la primera pantalla no absorba el fotón significa que éste ha pasado por el hueco, lo cual indica que alcanzará con seguridad la segunda pantalla. Por consiguiente, el hecho de no observar detección en el primer detector ya es condición suficiente para que haya reducción del vector de estado del fotón, para que haya el colapso que se produce cuando se da una observación. Una situación muy diferente sería que no existiera la primera pantalla y sólo existiera la segunda. Entonces no habría reducción del vector de estado, porque ya desde un principio no hubiera habido la posibilidad de que el fotón fuera absorbido por el primer detector. El fotón sólo hubiera tenido la posibilidad de ser absorbido por el segundo detector.

Además, Bohr diría que la perturbación que la observación y la medida provocan en el objeto cuántico es tan significativa que impide aceptar el realismo de EPR, puesto que la noción de “elemento físico” de éstos incluye la condición de que el sistema objeto no sea perturbado. Y esta condición nunca se puede cumplir. Bohr compararía la dependencia que el objeto tiene respecto a su interacción con el instrumento de medida¹¹⁸⁴ con la dependencia que tiene respecto al sistema de referencia según la teoría de la relatividad de Einstein. Ambas son inevitables, diría Bohr.

1182 Por ejemplo, en *La teoría atómica y la descripción de la Naturaleza* (p.99, 102, 112) y en *Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?*, respuesta de Bohr a EPR (p. 148)

1183 Hemos visto que Epstein, al interpretar su propio experimento, recogía esta interpretación de Bohr, así como también lo hacía Heisenberg al interpretar el de Renninger (1960)

1184 Bohr manifiesta, en el artículo de respuesta a EPR, que la interacción implica “un incontrolable intercambio de momento o energía entre los objetos de medida y todos los instrumentos que definen el sistema espaciotemporal de referencia”, pero es difícil entender cómo puede haber dicho intercambio en una interacción que es una simple posibilidad, como Bohr interpretaría que es la situación que se da en el experimento de Renninger (1960)

Finalmente, esta dependencia tiene profundas implicaciones filosóficas para Bohr, que la lleva a sus últimas consecuencias. Si el instrumento de medida siempre perturba el objeto no se puede identificar el estado de éste; sólo se puede escoger cómo manejar los instrumentos de medida para medir una magnitud u otra (por ejemplo, la posición o el momento). Así, la interacción entre objeto y aparato de medida implica “la necesidad de una renuncia final al ideal clásico de causalidad y una revisión radical de nuestra actitud hacia el problema de la realidad física”¹¹⁸⁵.

Sin embargo, ante los dos artículos de Renninger, Bohr aprobaría la presentación puramente conceptual que el autor da a sus trabajos, tanto el de 1953 como el de 1960, puesto que ambos autores muestran escaso interés por ofrecer un desarrollo formal matemático de sus propuestas. A uno y a otro lo que primordialmente les interesa es la interpretación, es decir, el significado físico de los enunciados fundamentales de la teoría cuántica.

7.2 ¿CÓMO INTERPRETARÍA EINSTEIN LOS EXPERIMENTOS DE RENNINGER?

El experimento de 1953:

Einstein valoró positivamente el experimento de Renninger y le escribió estas palabras de aprobación :

Me parece muy sensato que usted, a través de su experimento mental, haya llamado de nuevo la atención sobre el hecho de que la dualidad de las ondas-partículas sea una realidad sobre la cual no habría de generarse confusión mediante artificios metafísicos¹¹⁸⁶

Según Einstein un físico no ha de tratar los problemas físicos de una manera especulativa sino de una manera experimental, es decir, no ha de trabajar con enunciados abstractos, alejados de la realidad empírica, que no pueden ser contrastados porque no mantienen ningún contacto con dicha realidad. Y antes de realizar un experimento se lo ha de imaginar, se ha de planificar mentalmente con todo detalle los procedimientos a seguir para conseguir los objetivos propuestos. Cuando se

1185N.Bohr, Can Quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?,(1935) *Ibid.* (p.146)

1186Carta de A.Einstein a M.Renninger, datada el 27 de febrero de 1954

planifica un experimento mental no se sabe cuándo se va a realizar o incluso si se llegará a realizar algún día –recordemos que el de Renninger sí se ha realizado¹¹⁸⁷–. Pero el experimento mental siempre es intelectualmente interesante porque ayuda a clarificar las ideas esenciales de un proceso que se trata de comprender, a visualizar el esquema de una explicación con el que se pretende entender una situación que, en un principio, es aparentemente compleja e ininteligible. Al igual que Renninger, Einstein, como otros físicos de la época, Bohr, Heisenberg, Schrödinger, presentó muchos experimentos mentales que tuvieron gran repercusión¹¹⁸⁸.

La realidad de la onda

Según Einstein el resultado del experimento de Renninger coincidía con su propia concepción según la cual la onda es una realidad física tan existente como el corpúsculo, aunque no se le pueda asignar una localización como, de manera aproximada, se puede asignar a éste. Así, Einstein, después de haber leído el artículo de Renninger le había escrito lo siguiente:

Me causó gran placer la lectura de sus cuidadosas investigaciones cuyo resultado coincide completamente con mi propio punto de vista en este tema: en el concreto caso individual se ha de atribuir existencia real tanto al campo de onda como al (más o menos localizado) cuanto, a menos que se esté preparado para admitir una relación telepática entre objetos que se encuentran en diferentes regiones del espacio.¹¹⁸⁹

Como vemos, Einstein, como Renninger, consideraba necesario aceptar la realidad física de la onda para explicar la relación entre hechos que se encuentran separados en el espacio. Así pues, la justificación de Einstein era su principio de separación, según el cual el estado real objetivo del sistema S_1 no depende de lo que se hace en otro sistema S_2 que se encuentra espacialmente separado del primero. La violación de este principio implicaría la “misteriosa acción a distancia”, la “relación telepática” entre objetos que se encuentran notablemente alejados entre sí.¹¹⁹⁰

1187P.Kwiat, H.Weinfurter y A.Zeilinger, “Visión cuántica en la oscuridad”, *Investigación y ciencia*, enero de 1997

1188Por ejemplo, en este trabajo, aparecen los experimentos mentales con los que intercambiaron argumentos Einstein y Bohr, en el apartado 8.1 del capítulo de Bohr, el experimento de intentar determinar la posición de un electrón con un microscopio de rayos γ en el apartado 3 del capítulo de Heisenberg y el famoso experimento del gato de Schrödinger, en el apartado 3 del capítulo dedicado a este autor.

1189Carta de A.Einstein a M.Renninger, datada el 3 de mayo de 1953

1190Entendiendo principio de localidad como principio de separación. Ver apartado 3 del capítulo dedicado a Schrödinger en este trabajo

De esta forma, la existencia de la onda explicaba que el hecho de interponer una lámina en un brazo del interferómetro influía –causalmente diría Renninger-- en el patrón de interferencia de los detectores finales; si antes de colocar la lámina todos los fotones eran detectados en un detector, después de colocarla todos eran detectados en el otro. EPR dirían que podrían predecir con certeza dónde serían detectados todos los fotones dependiendo sólo de si se había interpuesto una lámina o no en el interferómetro.

La existencia de la onda como realidad física también explicaba que el hecho de interponer un objeto absorbente en uno de los brazos del interferómetro influía –causalmente diría Renninger– en el destello de los detectores finales, puesto que una cuarta parte de los fotones que se envían van al detector que entonces se ilumina, detector que aparece oscuro cuando no hay ningún objeto interpuesto.

La incompletud de la Mecánica cuántica

Mas lo esencial de la interpretación que Einstein haría del artículo de Renninger(1953) es que éste se sumaría a la crítica de EPR según la cual la mecánica cuántica no es una teoría completa, puesto que no contiene todos los elementos que podemos encontrar en la realidad física. Recordemos que según EPR en una teoría completa es necesario que cada elemento de la realidad física tenga su noción correspondiente¹¹⁹¹

Así pues, el experimento de Renninger desvelaba “elementos de la realidad” que la mecánica cuántica hubiera tenido que representar, pero que no representaba, puesto que esta teoría no contenía un elemento real existente que se manifestaba a través de dicho experimento, es decir, la onda de un sistema cuántico como realidad física; sólo la contenía como noción matemática que permite calcular la probabilidad de encontrar la partícula del sistema en una determinada región del espacio.

Renninger lo expresaba con estas palabras:

¹¹⁹¹Ver EPR(1935), *Ibid.* (p.138) y el apartado sobre la noción de realidad física en EPR en el capítulo de Enstein de este trabajo

Es obvio que precisamente la probada realidad de la onda asociada con la partícula individual, que, como se mantiene explícitamente, es incapaz de explicar, puede considerarse precisamente como una expresión de la incompletud mantenida por Einstein¹¹⁹²

Por otra parte, la mecánica cuántica tampoco contiene, según Renninger, el enunciado según el cual en un mismo experimento aparecen las propiedades ondulatorias y corpusculares de la luz, es decir, el enunciado según el cual no es necesario realizar dos experimentos distintos y excluyentes, o sea, complementarios, como los califica la interpretación dominante en mecánica cuántica.

No obstante, Renninger mostraba extrema cautela. Así en el artículo de 1953, cuando apuntaba a una posible relación de su trabajo con la crítica de incompletud presentada por EPR lo hacía con estas palabras: “No estoy seguro de si los hechos y conclusiones discutidos en este trabajo tienen alguna conexión con las dudas de A.Einstein sobre la completud de la descripción que ofrece la mecánica cuántica de los procesos elementales”¹¹⁹³. Y ya hemos visto que en el congreso de físicos celebrado en Innsbruck, al que también asistían Heisenberg y Schrödinger, Renninger manifestaba que, al presentar su experimento, que mostraba los dos aspectos de la naturaleza de la luz como simples hechos experimentales, no pretendía sustituir la interpretación ortodoxa por una nueva teoría sino que sólo pretendía mostrar hechos empíricos que una teoría completa del microcosmos había de explicar.¹¹⁹⁴

El experimento de 1960:

Einstein interpretaría este experimento de Renninger también como muestra de que la mecánica cuántica era una teoría incompleta, fundamentalmente por dos razones.

La primera razón es que la mecánica cuántica no incluye las medidas sin interferencia como la que describe Renninger, puesto que el sistema conceptual de dicha teoría contiene, como hemos visto, el enunciado de que cada observación y cada medida comportan una interacción, entre el objeto y el dispositivo, que implica necesariamente una perturbación del objeto. Según Einstein, el científico crea especulativamente, con su razón, sistemas conceptuales para, con ellos, explicar la información

¹¹⁹²M.Renninger (1953), *Ibid.* (p.8)

¹¹⁹³ M.Renninger (1953), *Ibid.*(p.7)

¹¹⁹⁴Según el escrito, no publicado, que Renninger leyó en dicha reunión celebrada en Setiembre de 1953, citado por M.Jammer. *The Philosophy of Quantum Mechanics, Ibid.* (p.494)

que los sentidos nos envían del mundo. Y en el experimento de Renninger los sentidos nos envían una información que la mecánica cuántica no explica. Así pues, esta teoría no ha de seguir manteniendo que absolutamente todas las observaciones y medidas van acompañadas de perturbación y ha de revisar sus enunciados fundamentales para incluir en ellos las medidas que no muestran interacción.

La segunda razón es que la mecánica cuántica sólo puede ofrecer la probabilidad de que, habiéndose enviado un fotón, éste sea absorbido por la primera pantalla o no lo sea. Es como el ejemplo de la bola, que puede encontrarse en dos cajas¹¹⁹⁵ Si no está en una caja está en la otra. Según Einstein, decir que hay una probabilidad de $\frac{1}{2}$ de que esté en cada caja no es una descripción completa.

La probabilidad, según Einstein, sólo ofrece la predicción del comportamiento futuro de conjuntos de elementos. Si en el dispositivo de Renninger se enviaran muchos fotones la mecánica cuántica podría predecir cuántos serían absorbidos por la primera pantalla y cuántos por la segunda y la posterior observación confirmaría adecuadamente la predicción. Dicha predicción surgiría del vector de estado inicial del fotón, que es una superposición de dos estados, el de ser absorbido por la primera pantalla y el de no ser absorbido – y el segundo significa ser absorbido por la segunda pantalla–. Este vector de onda sólo nos ofrece un conocimiento parcial, limitado, del fotón. Si en el intervalo de tiempo necesario para que el fotón llegue a la primera pantalla no ha sido detectado por ella, entonces, por inferencia lógica –a partir del concepto de probabilidad– no por una “acción telepática” ni por una “misteriosa acción a distancia”, se deduce que el fotón será detectado por la segunda pantalla. No es tampoco que la observación de la detección en la segunda pantalla haya reducido, retroactivamente, la función de onda inicial del fotón, como hemos visto que algunos creen que sostiene la interpretación de Copenhague¹¹⁹⁶. Simplemente el fotón sale de la fuente y choca con la primera pantalla o con la segunda. Si no lo hace con la primera lo hace con la segunda.

Ocurre como en el caso de la bola, que si no se encuentra en la primera caja es que se encuentra en la segunda. Al abrir la tapa, el observador lo único que hace es ver que está la bola o no está. Ver que no está la bola en la primera caja no hace que esté en la segunda. Lo único que hace es que el observador sepa que está en la segunda. Pero, antes de que el observador abriera la tapa, la bola ya

1195Citado en el apartado 3 del capítulo de Schrödinger de este trabajo

1196Según el punto de vista de Heisenberg que hemos visto que expone Renninger en el Epílogo de su artículo de 1960

estaba en la segunda caja, de la misma manera que hay lejanas estrellas en el Universo que aún no hemos descubierto pero existen y seguirán existiendo, aunque no lo sepamos, y de la misma manera que durante mucho tiempo se desconocía la existencia de estrellas que ahora conocemos; mas ellas existían, aunque para la humanidad no existieran. Los presupuestos de Einstein, como los de de Broglie y Renninger, son realistas como los de nuestro pensamiento y nuestro lenguaje habitual ; pero, según estos autores, no por ser cotidianos dejan de ser científicos.

Según Einstein, la mecánica cuántica sólo ofrece una predicción de las observaciones que de los conjuntos se pueden hacer en un futuro. Y éste no es el objetivo final del físico que lo que realmente busca es comprender por qué ocurre cada proceso individual, por qué cada elemento del conjunto se comporta como se comporta y así poder predecir el comportamiento futuro de cada elemento particular. Es decir, en el experimento de Renninger se habría de poder saber, en el caso de cada fotón, si sería absorbido por la primera pantalla o no y por qué y ello habría de derivarse de leyes simples y universales aplicadas a las condiciones iniciales en que se encuentra cada fotón. Así, el vector de onda, que pretende ser la descripción más completa posible del estado del fotón, habría de contener información sobre el posterior comportamiento de éste. La predicción probabilística que ofrece el vector de onda del fotón no agota todo lo que se puede decir de él. Por esta razón, según Einstein, el formalismo probabilístico no es tan esencial y significativo como considera la interpretación dominante de la mecánica cuántica.

Lo que sería esencial en la interpretación que la mecánica cuántica diera del experimento de Renninger es la capacidad de atribuir el concepto de causa a determinados fenómenos que influyen en el comportamiento del fotón, puesto que, según Einstein, la noción de causa permite justificar de la manera más satisfactoria posible los fenómenos observados. Hemos visto que la noción de causa forma parte del programa realista de Einstein. Así, el concepto de causa y el de realidad, aunque sean creaciones humanas, son inevitables para el investigador científico que, para entender los procesos que se dan en la Naturaleza, ha de entender, en primer lugar, los procesos que observa en los experimentos que prepara.

Hemos visto que la noción de realidad también forma parte del programa realista de Einstein. Por esta razón, según Einstein, la observación de los fenómenos refleja los hechos que se dan en el mundo real¹¹⁹⁷. Aunque Einstein admite que no se puede probar la existencia de una realidad

¹¹⁹⁷En contraste con autores significativos de la interpretación de Copenhague como von Neumann que hemos visto

correspondiente al concepto de realidad, el más abstracto de todos los conceptos, la acepta porque es un concepto productivo e insustituible para el físico. Recordemos que en la correspondencia que suscitó el artículo EPR¹¹⁹⁸ entre Schrödinger y Einstein éste escribía a aquél: "la física es una clase de metafísica; la física describe la realidad; la conocemos sólo a través de su descripción física. Toda física es una descripción de la realidad"¹¹⁹⁹. Así pues, en el experimento de Renninger un fotón sale de la fuente y será absorbido por la primera pantalla o no lo será. Si no es absorbido por ésta, entonces será absorbido por la segunda pantalla. Esta es la realidad que la mecánica cuántica habría de justificar y no justifica.

En conclusión, Einstein, ante los dos artículos de Renninger, hubiera compartido la concepción realista de su autor, el procedimiento experimental con el que pretendía justificar sus tesis sobre temas fundamentales de la mecánica cuántica y la conclusión de que la mecánica cuántica habría de revisar sus enunciados fundamentales.

7.3 ¿CÓMO INTERPRETARÍA HEISENBERG LOS EXPERIMENTOS DE RENNINGER?

El experimento de 1953:

El Heisenberg positivista y operacionalista, el que escribió los artículos fundamentales de 1925 y de 1927, aprobaría el propósito que Renninger manifestaba de limitarse a inferir conclusiones sólo a partir de hechos físicos "puramente experimentales"¹²⁰⁰, es decir, de observables, y de pretender demostrar empíricamente sus tres proposiciones. Mas este objetivo de Renninger plantea una reflexión: ¿es posible que un físico se atenga sólo a observables?, ¿es conveniente seguir fielmente la enseñanza de Mach?¹²⁰¹. Recordemos las palabras que Einstein había dirigido a Heisenberg¹²⁰²: "Únicamente la teoría decide qué es lo que uno puede observar", puesto que Einstein "opinaba que

que manifestaba que la experiencia permite enunciar que un observador ha llevado a cabo un determinado acto de percepción subjetiva, pero "nunca conduce a enunciados de este tenor: una magnitud física tiene determinado valor". Ver el subapartado 1.2, sobre von Neumann, de este capítulo

1198 El experimento de Renninger (1960), como el de 1953, nos llevan a pensar en EPR, puesto que son experimentos que, aunque de una manera menos explícita que EPR, también reprochan a la mecánica cuántica su incompletud.

1199 Ver el apartado sobre el gato de Schrödinger del capítulo dedicado a Schrödinger en este trabajo

1200 M. Renninger (1953), *Ibid.* (p.2). Esta expresión muestra que el realismo epistemológico de Renninger no está reñido con su positivismo metodológico, por el cual pretende fundamentar sus conclusiones en hechos empíricos.

1201 Ver el apartado de Mach en el capítulo de Einstein y en el de Schrödinger

1202 W. Heisenberg, *La parte y el todo. Ibid.* (p. 106)

cualquier teoría entrañaba magnitudes inobservables y que el principio de utilizar sólo magnitudes observables no era posible llevarlo consecuentemente a la práctica”¹²⁰³. Cuando Heisenberg había dicho a Einstein que se había limitado a aplicar la filosofía positivista en que él mismo se había basado al construir su teoría especial de la relatividad, éste le había respondido:”Puede que en algún momento haya utilizado esa filosofía y que incluso haya escrito sobre ella, pero no deja de ser un absurdo”¹²⁰⁴.

Así Heisenberg refiere que Einstein le había hecho ver que la noción de observación es problemática porque

Toda observación –argumentaba-- presupone que entre el fenómeno a observar y la percepción sensorial que finalmente entra en nuestra conciencia existe una relación unívoca y conocida. Pero de esa relación sólo podríamos estar seguros si conociésemos las leyes de la naturaleza que la determinan. Ahora bien, cuando es preciso poner en duda esas leyes –como sería el caso de la moderna física atómica–, entonces el concepto de “observación” pierde también su claro significado. Entonces es la teoría la que determina lo que puede observarse¹²⁰⁵.

Tales consideraciones, que eran nuevas para Heisenberg, ejercieron en él una honda impresión y fueron muy fructíferas para su trabajo posterior¹²⁰⁶.

Renninger(1953) manifiesta que tan solo pretende, como el Heisenberg positivista, el autor de los artículos de 1925 y 1927, limitarse a lo que observa en el interferómetro; posteriormente declara que demuestra experimentalmente “que la energía de cada fotón se mueve a través del espacio y el tiempo por un paso continuo y se concentra en la forma de una partícula”, que cada fotón lleva consigo una onda guía que, excepto en el hecho de no disponer de energía, obedece las leyes de las ondas electromagnéticas, y que la partícula puede encontrarse en una región con una probabilidad que es proporcional a la intensidad de la onda. Mas Renninger no pretende que estas proposiciones constituyan una explicación, tan solo pretende mostrar que la partícula con energía y la onda guía que lleva asociada son “*simplemente hechos experimentales*”¹²⁰⁷, sobre los cuales se ha de construir

1203W.Heisenberg, *Encuentros y conversaciones con A.Einstein y otros ensayos, Ibid.* (p 122)

1204W.Heisenberg, *Encuentros y conversaciones con A.Einstein y otros ensayos, Ibid.* (p. 123)

1205 W Heisenberg, *Encuentros y conversaciones con A.Einstein y otros ensayos, Ibid.*(p.123)

1206Heisenberg declara que la reflexión que le hizo Einstein le impresionó profundamente y fue muy beneficiosa para sus ulteriores desarrollos. Así lo manifiesta, por ejemplo, en “Encuentros y conversaciones con Einstein “ y en “La mecánica cuántica y una conversación con Einstein”

1207M.Renninger (1953) , *Ibid.*(p. 4)

posteriormente la explicación.

Pero Heisenberg le podría preguntar a Renninger: ¿Cómo observamos la onda y la partícula de energía? Cuando declaramos que observamos la onda asociada al fotón estamos describiendo nuestra percepción bajo la perspectiva de la teoría ondulatoria. Cuando declaramos que observamos la partícula de energía que ha sido absorbida por la pantalla, en realidad vemos un punto luminoso y estamos describiendo esta percepción nuestra con el concepto de partícula y el de energía. Ambas son nociones abstractas, que no corresponden a percepciones concretas y tangibles. Son conceptos propios de unas determinadas teorías que asumimos. Y especialmente nos preguntamos: ¿Qué observación corresponde al concepto de “onda vacía”?

El primer Heisenberg era un ferviente seguidor de Mach. Según este Heisenberg, la física únicamente había de describir correlaciones entre observaciones y había de eliminar las nociones de magnitudes que no pudieran observarse de forma directa. Con esta filosofía escribió su artículo de 1925 en el que estableció las bases de la mecánica cuántica. Así Heisenberg se proponía basar esta teoría en cantidades que fueran observables. Su postulado básico era el criterio positivista de la observabilidad de todas las cantidades utilizadas.

Además, como hemos visto, el Heisenberg positivista tampoco aceptaba el principio de causalidad. Una de las razones era que, por las relaciones de indeterminación, las medidas de las condiciones iniciales de las partículas no podían ser exactas. Al pretender medirlas se interfiere con ellas y, por consiguiente, se perturban las magnitudes que se pretende medir. Por tanto, si no se conocen exactamente las condiciones iniciales no se puede determinar la evolución posterior. Así pues, este Heisenberg tampoco hubiera aceptado la noción de “realidad física” que Renninger caracterizaba como entidad sobre la cual se puede causalmente influir. Y obviamente tampoco hubiera aceptado la noción de “realidad física”, por no ser directamente observable.

Pero Heisenberg pronto había abandonado su actitud positivista y había adoptado una postura crítica con el positivismo. Como también había hecho Einstein¹²⁰⁸, que en un principio, al elaborar su teoría especial de la relatividad, había sido inspirado por Mach y, en cambio, posteriormente le había acusado de paralizar la inspiración y la creación, debido a las prohibiciones epistemológicas

1208Y en el cambio de actitud filosófica que, respecto al positivismo de Mach, realizó Heisenberg parece ser que la entrevista que en 1926 mantuvo con Einstein ejerció una notable influencia

que imponía. Entonces posiblemente Heisenberg no hubiera aceptado que la partícula de energía y la onda guía a ella asociada fueran simplemente hechos experimentales. Y posiblemente sí hubiera aceptado que se puede considerar en física la noción de realidad física e incluso caracterizarla como causalmente influible.

Una muestra de la visión que posteriormente Heisenberg tenía de la influencia que la filosofía de Mach había ejercido en la teoría cuántica constituyen las siguientes consideraciones, manifestadas en 1958:

no cabe duda de que las ideas de Mach han fecundado una y otra vez el desarrollo de la física a partir del descubrimiento de Planck. Pero esta influencia tampoco debe sobrestimarse. En particular, la teoría de los cuantos, en su versión hoy generalmente admitida, no considera en modo alguno las impresiones sensoriales como lo dado primariamente, como hace el positivismo.¹²⁰⁹

y en el experimento del interferómetro de Renninger ¿cuáles son las impresiones sensoriales? Simplemente unos destellos que se ven en diferentes detectores.

El experimento de 1960:

Heisenberg interpretaría el experimento de Renninger(1960) desde dos puntos de vista, que corresponden a dos de sus nociones propias, bajo la perspectiva de sus relaciones de indeterminación y bajo la perspectiva de su concepto de potencialidad.

En primer lugar, como hemos visto, según Heisenberg, en los procesos cuánticos no puede despreciarse la perturbación producida por una observación; puesto que no se pueden evitar las relaciones de indeterminación, argumento que también Bohr había manifestado reiteradamente.

En segundo lugar, hemos visto que Heisenberg interpretaba el principio de superposición con la noción aristotélica de ser en potencia. Así pues, Heisenberg consideraba los componentes de la función de estado de un sistema cuántico como las potencialidades de Aristóteles. Cada uno de ellos

¹²⁰⁹W.Heisenberg en la conferencia pronunciada en 1958 con motivo de los actos conmemorativos del centenario del nacimiento de M.Planck, “El descubrimiento de Planck y las cuestiones filosóficas fundamentales de la teoría atómica” en *Los nuevos fundamentos de la ciencia*, Editorial Norte y Sur, Madrid (1962) (p.160)

representa una posibilidad, una potencialidad. Cuando el sistema es observado sólo una de estas posibilidades se hace realidad –y se supone que, básicamente, todos los sujetos vemos la realización de la misma posibilidad–. En palabras de Heisenberg, la “reducción del paquete de ondas” siempre aparece cuando se completa la transición de lo posible a lo real¹²¹⁰, es decir,

la transición de lo “posible” a lo que está “en acto” se produce en el momento de la observación. Si queremos describir lo que sucede en un acontecimiento atómico, debemos comprender que el término “sucede” solo puede aplicarse a la observación, no al estado de cosas entre dos observaciones. Se aplica al acto físico (no al psíquico) de la observación y podemos decir que la transición entre la “potencia” y el “acto” tiene lugar tan pronto como se produce la interacción entre el objeto y el instrumento de medida y, con ello, el resto del mundo¹²¹¹

De esta forma, el mundo cuántico es un mundo de posibilidades. Y Heisenberg también interpreta el experimento de Renninger(1960) bajo esta perspectiva, bajo el punto de vista de la noción de la potencialidad. Esta interpretación que ofrece Heisenberg del experimento de Renninger (1960) recuerda la réplica de Bohr¹²¹² a EPR¹²¹³ y la interpretación de Epstein¹²¹⁴ de su propio experimento, inspirado también en EPR.

Así, según Heisenberg, la pantalla S_1 constituye una posibilidad para el fotón, que puede ser absorbido por ella. Esta primera pantalla actúa como medida, porque reduce la función de onda del fotón. Si no existiera esta pantalla, si no existiera la posibilidad de que el fotón fuera absorbido por ella, entonces no habría reducción, no habría colapso. También podemos pensar que si el experimento de Renninger(1960) tuviera, no una única pantalla interior, sino dos pantallas como la del experimento, y una pantalla exterior completamente esférica, entonces al principio habría 3 posibilidades y si el fotón no hubiera sido absorbido por la primera o la segunda pantalla sabríamos que sólo puede ser absorbido por la tercera. Y lo mismo sucedería si hubiera más pantallas interiores. Todo ello hace pensar que quizás la reducción constituye simplemente un pensamiento, en el sentido de que es la expresión matemática de la conciencia que tenemos los seres humanos – asumiendo que todos los seres humanos la tenemos de la misma forma– de un hecho físico, el cambio de las posibilidades de actuación que tiene un sistema cuántico.

1210W. Heisenberg, *Física y filosofía*, *Ibid.* (p 118)

1211W. Heisenberg, *Física y filosofía*, *Ibid.* (p.39)

1212M. Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, *Ibid.*(p.496)

1213Y por esta razón hemos considerado que también Bohr interpretaría el experimento de Renninger (1960) bajo la perspectiva de la noción de posibilidad

1214Ver apartado anterior dedicado al experimento de Epstein en este capítulo

Así pues, las posibilidades de los resultados que puede presentar la observación de un sistema cuántico, las expectativas que esperamos de él, las presentamos en la forma matemática del principio de superposición. Cuando, por diferentes razones, se produce una alteración de dichas expectativas, entonces necesariamente se produce también una alteración de la función de onda que representa el sistema. Una razón puede ser una medida real, con interferencia, que podemos calificar de “positiva”. Pero otra razón puede ser una medida “negativa”, sin interferencia, como la de Renninger(1960). El hecho físico de que el fotón tenía la posibilidad de ser absorbido por la primera pantalla y no lo ha sido indica que será absorbido por la segunda pantalla, porque al fotón no le queda ninguna otra posibilidad. Y este hecho físico lo expresamos matemáticamente, porque la ciencia física pretende describir matemáticamente los fenómenos de la naturaleza, ya que el lenguaje formal es el que aporta mayor precisión, simplicidad y claridad.

Quizás la noción de reducción de la función de onda, de colapso, es un concepto que ha creado nuestra mente para resumir los complejos procesos físicos que ocurren cuando observamos o medimos un objeto cuántico, tanto si hay interferencia como si no la hay. Suponemos que dicho objeto evoluciona según la ecuación de onda de Schrödinger pero no podemos decir exactamente cómo, no entendemos qué le ocurre cuando lo observamos, cómo ha llegado al estado que contemplamos. Lo único que podemos decir es que han cambiado las posibilidades que presentaba antes de que fuera observado.

El problema de la medida, de la incompatibilidad entre la evolución del sistema según la ecuación de Schrödinger y el proceso de observación que rompe repentinamente dicha evolución, manifiesta el rechazo intelectual que sentimos ante este brusco salto que no podemos entender. Le llamamos “colapso” porque lo vemos como una caída, un accidente, que sale fuera de la evolución normal¹²¹⁵ y le llamamos “reducción” porque disminuye sus expectativas iniciales, de las cuales extrae sólo una, que es la que se realiza, la que percibe el sujeto, aquella de la cual es consciente. Este potencia hecha realidad, el resultado de la observación, es objetiva, porque pensamos que todos los seres humanos la vemos esencialmente igual y asumimos que corresponde a un hecho físico que, por supuesto, también es objetivo, porque asumimos que ocurre en la Naturaleza.

1215 Del latín “collapsus”, participio pasado de collabi”, compuesto con “labi”, caer, deslizarse. M.Moliner “Diccionario de uso del español”. Editorial Gredos. Madrid (1988)

7.4 ¿CÓMO INTERPRETARÍA SCHRÖDINGER LOS EXPERIMENTOS DE RENNINGER

El experimento de 1953

Schrödinger compartiría el objetivo de Renninger de mostrar que la onda es una realidad y de demostrar su carácter físico con un dispositivo que muestra las franjas de interferencia como es el interferómetro óptico que utiliza Renninger, puesto que el fenómeno de interferencia revela con claridad el carácter ondulatorio de la luz. Schrödinger también compartiría con Renninger la concepción de que la onda se propaga de forma continua en el espacio y el tiempo; puesto que tanto el carácter de continuidad (*el continuum*) como la situación en el marco del espacio y tiempo proporcionan *Anschaulichkeit*, claridad intuitiva, al modelo científico. Hemos visto que, según Schrödinger, no podemos pensar en los fenómenos sin situarlos en el espacio y el tiempo, de manera que lo que no podemos comprender en las coordenadas espacio-temporales no lo podemos comprender en absoluto. Y el espacio en el que Renninger sitúa los fenómenos que observa es el espacio habitual, el espacio de tres dimensiones, más intuitivo, como Lorenz señalaba y el mismo Schrödinger admitía, que el “espacio de configuración” de su propio modelo, cuyas dimensiones son tres veces el número de partículas del sistema.

Schrödinger también aceptaría el argumento con el que Renninger pretendía probar que la onda es una realidad, argumento que se basaba en el criterio de que es realidad física aquella entidad en la cual es posible influir de manera que los futuros resultados de los experimentos muestren de manera “inambigua”¹²¹⁶ que han sido causalmente influidos por la actuación experimental. Este criterio de Renninger es muy cercano al que proponía Schrödinger ante una pregunta epistemológica que, dentro de un marco con fuertes influencias positivistas, se planteaban los físicos de la época que se dedicaban a la teoría atómica: ¿se puede aceptar como real una entidad no observable? Recordemos que la respuesta de Schrödinger era afirmativa: Sí, se puede aceptar en el caso de que se puedan observar los efectos a través de los cuales esta entidad se manifiesta. Así, podemos pensar que Schrödinger se refiere, en general, a todos los efectos que manifiestan la existencia de una entidad, dentro de los cuales se encontrarían los efectos provocados por las actuaciones de los científicos en los experimentos, a los cuales, en particular, se refiere Renninger.

1216M.Renninger “On Wave-Particle Duality” (1953) (p.1)

Así pues, Schrödinger aceptaría, como Renninger, que la onda es una realidad física, no es sólo un recurso formal matemático para calcular probabilidades. Schrödinger coincidiría con Renninger en el propósito de ir más allá de la interpretación estadística, buscando una explicación más profunda, que ofrezca el porqué de los fenómenos atómicos, porque la ciencia tiene el objetivo de hacer inteligible el mundo de la experiencia. La interpretación estadística deja un vacío de inteligibilidad que con el tiempo se ha de llenar. La tarea propia de la ciencia es construir modelos que constituyan representaciones de los fenómenos naturales. El científico ha de creer en la realidad y, por consiguiente, ha de construir teorías realistas, es decir, con lenguaje y supuestos realistas. Ha de sentir que con sus experimentos se está acercando a la realidad, como con el que Renninger presenta, que le revela que se pueden “ver” objetos sin que la luz impacte sobre ellos.

Con Renninger, Schrödinger también compartiría el objetivo de que las representaciones que la ciencia ofrece de la realidad sean lo más intuitivas, lo más claras, lo más visuales posible. A pesar de lo alejados que los fenómenos cuánticos están de nuestros sentidos, no se ha de perder la esperanza de llegar a visualizarlos, a imaginarlos. No hay que renunciar a la visualización en la teoría cuántica, porque la visualización, utilizada con cautela, con plena conciencia de sus limitaciones, siempre es beneficiosa y útil, tanto en física clásica como en física atómica, puesto que ayuda a entender el mundo, lo hace más inteligible, lo cual constituye uno de los objetivos fundamentales de la ciencia como tal. Si la ciencia abandonara dicho objetivo dejaría de ser ciencia.

Pero, si damos un giro radical a nuestra perspectiva, y miramos el trabajo de Renninger bajo el punto de vista de la metafísica monista que, en el fondo, aceptaba Schrödinger, la realidad física, tanto de la onda como de los objetos materiales, es un supuesto y constituye tan sólo una construcción mental de la conciencia, puesto que Schrödinger, de los dos ámbitos en los cuales tradicionalmente hemos dividido la realidad, el físico y el psíquico, cuya interacción no puede explicar, piensa que existe sólo uno de ellos; y ha optado por la existencia del segundo, puesto que es el único del que puede estar seguro¹²¹⁷. Pero la cuestión ontológica sobre la existencia y/o del dominio físico y psíquico no aparece en absoluto como objeto de interés intelectual en el artículo de Renninger(1953), que no se introduce en las profundas cuestiones metafísicas del monismo, el dualismo y del realismo, como si hace Schrödinger. Posiblemente porque son cuestiones especulativas a las que Renninger no ve ninguna posibilidad de responder vía empírica, *a posteriori*,

1217Ver el apartado del monismo de Schrödinger

lo cual no ha sido un obstáculo para Schrödinger, que las ha abordado *a priori*, vía racional.

El experimento de 1960

Este experimento IFM de Renninger, que muestra que hay medidas en las que se produce la reducción del vector de onda del objeto sin que haya interacción entre éste y el dispositivo, constituye una auténtica paradoja a explicar, un auténtico desafío para la interpretación de la mecánica cuántica, no como el experimento del gato que está simultáneamente vivo y muerto, que también ha sido considerado una paradoja cuántica, pero en realidad no lo es; su carácter aparentemente paradójico proviene, simplemente, del uso indebido del formalismo cuántico, puesto que si se limita la noción de superposición de vectores de estado a los objetos a los que está exclusivamente destinada, que son los objetos del dominio cuántico, y no se la aplica a objetos macroscópicos, como el gato, no se presenta ninguna paradoja.

En cambio, las IFMs son fenómenos paradójicos que existen en la realidad, que Renninger los ha descubierto y los ha mostrado para que sean integrados en el sistema conceptual de la interpretación de la mecánica cuántica. Los hechos son lo primero, como manifestaba Renninger¹²¹⁸. Así, las IFM constituyen uno de los vacíos que presenta la imagen del mundo que ofrece la interpretación dominante. Pero este vacío no es definitivo. Hay que agudizar el ingenio para llenar este hueco con nuevos esquemas conceptuales que ofrezcan una visión del mundo más completa, como Schrödinger hizo presentando su propuesta para explicar los saltos cuánticos a través de un proceso continuo.

El experimento de Renninger(1960) muestra el problema cuántico de la medida bajo un nuevo aspecto. Antes de dicho experimento, el problema consistía en que, según la interpretación dominante, el vector de estado de un objeto evolucionaba continua y causalmente según la ecuación de Schrödinger hasta que se realizaba una medida, que era un cambio abrupto y discontinuo al que no se le podía encontrar ninguna causa. Esto también ocurre en el experimento de Renninger, aunque sea una “medida negativa”, puesto que el hecho de que al pasar el fotón por la esfera imaginaria que trazaría la primera pantalla y no chocar con ella –porque el fotón pasa por el orificio– constituye una reducción del vector de onda del fotón, puesto que este vector, que consistía

1218En su carta a Einstein datada el 30-5-53

en la superposición de dos componentes, pasa, por este hecho, a tener un solo componente. Pero el nuevo aspecto del problema que presenta Renninger es que, según la interpretación de Copenhague, siempre que hay reducción de onda ha habido interacción entre objeto e instrumento. En cambio, en este experimento hay reducción sin interacción.

Por otra parte, la interacción entre el dispositivo y el objeto es central en la interpretación dominante, puesto que es la justificación de muchos de sus enunciados fundamentales, que llevan a la renuncia de principios básicos de la física clásica. Así, dicha interacción provoca la unidad indisoluble, según Bohr, entre el sujeto, que maneja el dispositivo, y el objeto y hace imposible la objetividad científica. Dicha interacción justifica también las relaciones de indeterminación de Heisenberg. Dicha interacción es, además, la responsable de que no se pueda prever el estado futuro del objeto –porque la interacción, por el rango de las dimensiones en el dominio cuántico, es incontrolable–; por tanto, es la responsable de que no se puedan establecer relaciones causales entre fenómenos, de que en mecánica cuántica los físicos se hayan de conformar con ofrecer correlaciones y predicciones puramente estadísticas. Por consiguiente, la existencia de IFMs habría de llevar a una reconsideración del marco establecido para estudiar los fenómenos cuánticos, a la revisión del abandono de muchos de los presupuestos fundamentales de la ciencia occidental que piden los seguidores de la interpretación dominante, a los que Schrödinger considera excesivamente pesimistas, por haber renunciado demasiado fácilmente a principios que han proporcionado tantos éxitos a la física, en lugar de transformar sus esquemas mentales para seguir manteniendo dichos principios con la esperanza de, con ellos, cosechar nuevos éxitos .

8. DESARROLLOS POSTERIORES

8.1 EL EXPERIMENTO DE ELITZUR Y VAIDMAN

Aproximadamente cuarenta años después de que Renninger hubiera publicado su artículo sobre la dualidad onda-partícula, Elitzur y Vaidman publicaron¹²¹⁹ un experimento que sorprende por sus similitudes con los dos experimentos de Renninger, el de 1953 y el de 1960. El experimento de Elitzur y Vaidman, quienes no conocían los artículos de Renninger cuando idearon su experimento, inició una lista de sorprendentes experimentos que se han denominado “Interaction-free

1219A. Elitzur y L. Vaidman, “Is it possible to know about something without ever interacting with it?”, *Vistas in Astronomy*, Vol 37, p. 253-256 (1993)

Measurements”¹²²⁰, medidas nulas o medidas de resultado negativo, cuya interpretación tiene una gran significación teórica e incluso, con el tiempo, quizás también aplicación práctica.

Mas hay que reconocer el trabajo de Renninger, que fue anterior y, por tanto, constituye el primer germen de una larga y productiva serie de significativos trabajos que han continuado en los prometedores trabajos de computación cuántica. Vamos a ver que el montaje de Elitzur y Vaidman es el mismo que el de Renninger(1953) y el concepto de medida sin interacción de Elitzur y Vaidman es el mismo que el de Renninger(1960). Pero el de Renninger(1953) es teóricamente más ambicioso, puesto que persigue un objetivo más amplio, más fundamental, que es mostrar, dentro de un marco filosófico de realismo, que la onda de un sistema cuántico es una realidad física –no es sólo un instrumento para calcular probabilidades–, y en este objetivo se incluyen objetivos particulares, como son el mostrar que la inserción de una lámina transparente provoca un cambio de patrón de interferencia, lo que prueba el carácter ondulatorio del sistema cuántico, y el mostrar que la absorción del fotón por parte del objeto sólo se produce en uno de los brazos del interferómetro, lo que prueba el carácter corpuscular. Y para mostrar este segundo fenómeno Renninger también muestra que hay una probabilidad del 25 % de que, habiendo un objeto interpuesto, el fotón no sea absorbido por éste y salga por el detector que nunca sale, lo cual indica que el objeto existe sin que éste haya interactuado con el corpúsculo, es decir, haya intercambiado energía con el fotón, lo cual constituye una observación sin interacción.

Mostrar esta observación sin interacción, como hemos visto, no es reconocido explícitamente por Renninger como un objetivo de su artículo de 1953 pero, en cambio, el objetivo declarado de su artículo de 1960 es hacer ver que existen las observaciones sin interacción a través de un nuevo ejemplo, el del fotón que al ser absorbido por la segunda pantalla revela la existencia de la primera pantalla, que no ha tocado. Como el objetivo de Elitzur y Vaidman es mostrar que es posible detectar objetos sin que interactue con ellos ningún fotón, podemos decir que el objetivo de Elitzur y Vaidman y el de Renninger(1960) son, en esencia, el mismo. En el experimento de Renninger(1953) este hecho queda implícito, oculto, tras el objetivo principal que manifiesta el autor. Por esta razón, Vaidman cita en muchos de sus trabajos¹²²¹ el artículo de Renninger (1960) como precedente de los experimentos IFM y lo compara con el suyo y sólo en muy pocos artículos cita el de Renninger (1953), del cual se limita a decir¹²²² que, en conversación privada:

¹²²⁰La misma expresión con la que W.De Baere traduce el artículo que Renninger publicó en 1960

¹²²¹Como en sus artículos de 2001, de 2002 y de 2008

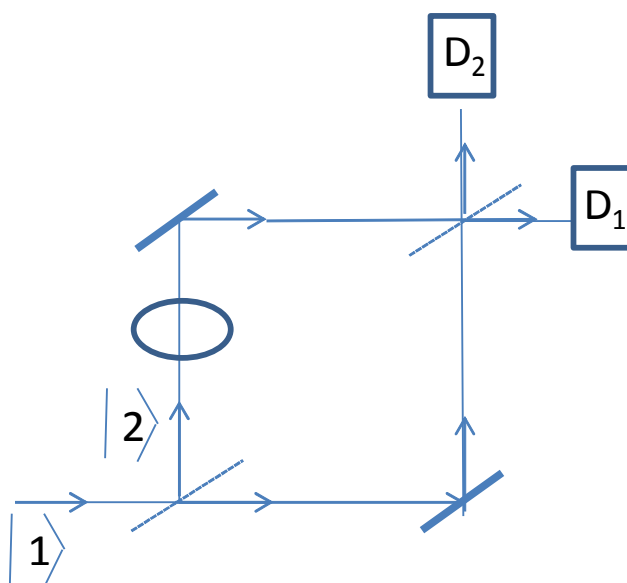
¹²²²L.Vaidman, “The meaning of the Interaction-Free Measurements”, *Foundations of Physics*, Vol. 33, Nº 3 (2003)

Paul le había señalado que hay un artículo más antiguo de Renninger en que se consideraba un dispositivo experimental casi idéntico al del IFM de Elitzur y Vaidman: un interferómetro Mach-Zehnder preparado para tener un resultado de oscuridad en uno de los detectores. Pero Renninger nunca contempló su experimento como una medida de un objeto que se encontraba dentro del interferómetro¹²²³

Y Vaidman, en su artículo de 2006, continua describiendo el experimento de Renninger(1960), no el de Renninger(1953).

Volvamos al experimento de Elitzur y Vaidman. Por el interferómetro, que, como el de Renninger, está preparado para que todos los fotones se detecten en D_1 , se envían fotones uno a uno. Pero el objetivo de Elitzur y Vaidman no es el de Renninger; es probar que se puede saber que hay un objeto interpuesto en uno de los brazos del interferómetro sin que ningún fotón interactue con él.

He aquí el esquema del dispositivo:



(Fig. 8.1)

Representemos el objeto con la figura elíptica y designemos el estado del fotón que se desplace hacia la derecha como el vector $|1\rangle$ y el del que se desplace hacia arriba como el vector $|2\rangle$.

¹²²³L.Vaidman (2003) (p.501)

Elitzur y Vaidman envían fotones, uno a uno, por el interferómetro y observan que se dan tres posibilidades:

- 1) Que ningún detector centellee.
- 2) Que el detector D_1 centellee.
- 3) Que el detector D_2 centellee.

La primera situación muestra que el fotón ha sido absorbido o dispersado por el objeto y nunca ha llegado a los detectores. Por tanto, en esta situación no se ha conseguido el objetivo de que el fotón indique la presencia del objeto sin interactuar con él. La probabilidad de este resultado es $\frac{1}{2}$.

En la segunda situación, cuya probabilidad es $\frac{1}{4}$, tampoco se ha conseguido el objetivo porque el fotón podría haber llegado al detector D_1 en dos casos:

- a) En el caso de que no hubiera ningún objeto, porque el interferómetro está preparado para que, en su funcionamiento normal, presente interferencia constructiva en D_1 e interferencia destructiva en D_2
- b) En el caso de que un objeto obstruya un brazo del interferómetro pero el fotón se desplace por el otro brazo.

Y con sólo ver el destello en D_1 no podemos saber si se da el primer caso o el segundo.

En la tercera situación, cuya probabilidad es $\frac{1}{4}$, sí se ha conseguido el objetivo, es decir, el centelleo de D_2 indica que existe un objeto en el interferómetro sin que el fotón haya interactuado con él, porque sabemos que si hubiera habido interacción entonces el fotón hubiera sido absorbido o dispersado por el objeto y, por consiguiente, no hubiera podido llegar a D_2 .

Para justificar estos resultados observados, Elitzur y Vaidman utilizan el formalismo propio de la mecánica cuántica, los vectores de estado. Con este formalismo, estos autores hacen mucho más inteligible el experimento de Renninger(1953) y ofrecen más precisión al experimento que éste sólo había presentado en forma conceptual. Así, la operación que el primer divisor de haz ejerce sobre el fotón y que hace que tenga un componente transmitido y otro reflejado, se representa, en el vector de estado del fotón, con la siguiente superposición:

$|1\rangle = 1/\sqrt{2} [|1\rangle + i |2\rangle]$ y $|2\rangle = 1/\sqrt{2} [|2\rangle + i |1\rangle]$, teniendo en cuenta que el número imaginario i acompaña al componente reflejado por el cambio de fase de $\frac{1}{4}$ de longitud de onda que se produce entre el haz reflejado y el haz transmitido.

Por esta razón, la operación de los espejos que reflejan el fotón es descrita por:

$$|1\rangle \rightarrow i |2\rangle \quad \text{y} \quad |2\rangle \rightarrow i |1\rangle$$

Si no se interpone ningún objeto este dispositivo es el interferómetro habitual, en el que la evolución del estado del fotón se describe de la siguiente forma:

$|1\rangle$ por la acción del primer divisor de haz se convierte en $1/\sqrt{2} [|1\rangle + |2\rangle]$, que por el reflejo en los espejos se convierte en $1/\sqrt{2} [i |2\rangle + i |1\rangle]$, que por la acción del segundo divisor de haz se convierte en $\frac{1}{2} [i |2\rangle - |1\rangle] - \frac{1}{2} [|1\rangle + i |2\rangle]$, que es simplemente $-|1\rangle$

Por tanto, el fotón siempre sale del interferómetro moviéndose hacia la derecha por el detector D_1 , que entonces centellea.

Pero si en el brazo del interferómetro hay un objeto entonces la evolución del fotón que penetra en el interferómetro se describe de la forma siguiente:

$|1\rangle$ por la acción del primer divisor de haz se convierte en $1/\sqrt{2} [|1\rangle + i |2\rangle]$, que se transforma en un componente de fotón reflejado por el espejo de abajo y un componente de fotón dispersado por el objeto, que toman la forma de $1/\sqrt{2} [i |2\rangle + i |\text{dispersado}\rangle]$, que por la acción del segundo divisor

de haz se convierte en $\frac{1}{2} [i |2\rangle - |1\rangle] + i/\sqrt{2} | \text{dispersado} \rangle$, donde el componente $|2\rangle$ significa que el fotón sale por arriba, es decir, por el detector D_2 , $|1\rangle$ significa que sale en dirección hacia la derecha, es decir, por el detector D_1 . Así, por la ley estadística de Born, hay una probabilidad de $\frac{1}{4}$ de que D_2 centellee, una probabilidad de $\frac{1}{4}$ de que lo haga D_1 y una probabilidad de $\frac{1}{2}$ de que el fotón sea dispersado por el objeto.

Por consiguiente, vemos que el fotón sólo puede ser detectado por D_2 si hay un objeto en el brazo del interferómetro. Así, el destello de D_2 ofrece la información que se busca, la información de que el objeto está presente, sin que el fotón le haya tocado. Por tanto, constituye una observación de la existencia del objeto sin mediar interacción con él.

Este fenómeno puede explicarse a través de la naturaleza ondulatoria y corpuscular¹²²⁴ del *quantum*. Por una parte, en ausencia del objeto, el fotón se comporta como una onda; entonces los dos caminos posibles son indistinguibles y se da interferencia; en consecuencia, es el carácter ondulatorio de la luz incidente el que permite establecer, a través de la interferencia destructiva, una condición de que el fotón nunca llegue al detector oscuro D_2 ; pero, por otra parte, en presencia del objeto, el fotón se comporta como un corpúsculo que se desplaza por un único camino, no se da ninguna interferencia y los resultados posibles se excluyen entre sí, puesto que el fotón o bien es absorbido o bien es detectado por D_1 o bien es detectado por D_2 .

En síntesis, ante la cuestión de si enviando un fotón por un interferómetro se puede saber si hay un objeto interpuesto sin que el fotón incida sobre él, Elitzur y Vaidman responden afirmativamente. Pero en principio sólo se puede saber con una probabilidad de éxito de $\frac{1}{4}$, como ya había visto Renninger. Mas Elitzur y Vaidman también descubren que esta probabilidad se puede incrementar hasta $\frac{1}{3}$ si se repite el proceso utilizando de nuevo el fotón que ha salido por D_1 , es decir, por el detector que no ha aportado ninguna información. Así, volviendo a introducir dicho fotón por el interferómetro (es decir, por el lado izquierdo del dispositivo, según la figura) al final del recorrido hay una probabilidad de $\frac{1}{4}$ (que multiplicado por el $\frac{1}{4}$ anterior da una probabilidad de $\frac{1}{16}$) de detectar el fotón reciclado en D_2 . Mas también existe una probabilidad de $\frac{1}{16}$ de que el fotón sea detectado en D_1 y de esta manera no aporte tampoco ninguna información. Entonces se lo puede introducir de nuevo en el interferómetro una y otra vez; así repitiendo este procedimiento N veces,

¹²²⁴P.Kwiat, H. Weinfurter, T. Herzog, A. Zeilinger y M.A. Kasevich, "Interaction-Free Measurement", *Physical Review Letters*, **74**, 24 (p. 4763-4766) (1995)

en el límite de $N \rightarrow \infty$ la probabilidad de detectar la bomba sin detonarla es $\frac{1}{4} + \frac{1}{16} + \frac{1}{64} + \frac{1}{256} + \dots \approx \frac{1}{3}$. Elitzur y Vaidman también predijeron que modificando de forma apropiada la reflectividad de los divisores de haz se podía conseguir una probabilidad de éxito de $\frac{1}{2}$. Así, reduciendo la reflectividad del primer divisor de haz se restringe la probabilidad de que el fotón se refleje hacia el camino donde está el objeto y se logra que hasta la mitad de las mediciones se realizasen sin interacciones.

8.2 LA VERSIÓN DE PENROSE

Los experimentos IFM son considerados por R. Penrose¹²²⁵ uno de los enigmas más profundos que presenta la teoría cuántica. Entre los misterios que muestra dicha teoría, este autor distingue dos categorías: los misterios-Z, o misterios *puzzle*, y los misterios-X, o misterios *paradox*. Según Penrose, los primeros son auténticamente desconcertantes y enigmáticos y no los podemos eludir porque están directamente avalados por la experiencia. Ejemplos de ellos son el fenómeno EPR y los experimentos IFM. En cambio, los segundos resultan enigmáticos porque parecen ser consecuencia del formalismo cuántico, pero no los podemos aceptar como auténticos misterios, puesto que son implausibles y no podemos creer que sean ciertos. Un ejemplo es la paradoja del gato de Schrödinger, según la cual el formalismo cuántico parece decirnos que los objetos macroscópicos, como un gato, pueden existir simultáneamente en dos estados diferentes, como estar vivo y estar muerto a la vez. Según Penrose, estas últimas paradojas, los misterios-X, son inaceptables puesto que surgen del hecho de que la teoría cuántica no es completamente precisa en el nivel de los fenómenos en que dichos misterios aparecen.

Los experimentos IFM pertenecen a la categoría de los auténticos misterios-Z, según Penrose, quien ofrece una versión de estos experimentos, que se basa en el hecho de que, para dar más emoción a su experimento, Elitzur y Vaidman habían imaginado que el objeto interpuesto en el interferómetro era una bomba muy sensible que estallaba cuando le llegaba un solo fotón. Entonces la cuestión presentaba un evidente interés práctico: ¿se podría saber si existe la bomba sin que ésta llegara a explotar?¹²²⁶. Hemos visto que sí. Mas Penrose propuso una nueva versión de la IFM de Elitzur y

1225R. Penrose, *Shadows of the Mind*, Vintage, London (1995)

1226L. Vaidman declara: "A. Elitzur vino hacia mí con la cuestión siguiente: *Supón que hay un objeto que cualquier interacción con él lleva a una explosión. ¿Podemos localizar el objeto sin que explote?* Nuestro trabajo conjunto dió una respuesta positiva a esta cuestión" L. Vaidman "Are interaction-free measurements interaction free? (2008) arXiv:quant-ph/ 16 Jun 2000 ,(p.2)

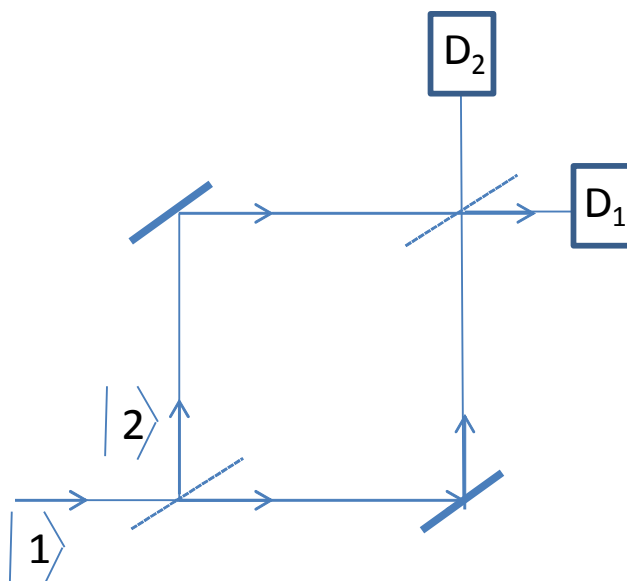
Vaidman ofreciendo un método para probar una propiedad de un objeto sin interactuar con él. El objeto era de nuevo una bomba que explota cuando un solo fotón toca un dispositivo detonador hipersensible que está unido a la superficie de la bomba. Pero el problema es que hay bombas defectuosas, en el sentido de que su dispositivo detonador está obstruido, no funciona y, aunque la luz impacte sobre él, no provoca la explosión de la bomba. Entonces el objetivo consistía en que, disponiendo de un conjunto de bombas entre las que había algunas que podían ser defectuosas, se había de averiguar las que eran buenas –no defectuosas-- sin que llegaran a explotar.

Para averiguarlo, supongamos también que el detonador consiste en un espejo unido a la superficie de la bomba de manera que si el fotón se refleja en el espejo su retroceso es suficiente para que se mueva un émbolo que la haga detonar; pero esto no ocurre si la bomba es defectuosa, porque entonces el émbolo está atascado. El problema consiste en averiguar, antes de que exploten, si las bombas no son defectuosas. Así pues, el objetivo del experimento es encontrar, entre una gran cantidad de bombas cuestionables, una bomba que esté garantizado que no es defectuosa.

Según la física clásica no hay manera de averiguarlo, puesto que no hay manera de saber, cuando la bomba ya está montada, si al construirla se ha atascado el detonador o no, a no ser que se lo mueva realmente. Y cuando se mueve el detonador, si la bomba no es defectuosa, ésta explota. Pero según la teoría cuántica sí hay manera de saberlo sin llegar a mover el detonador, o sea, sin provocar la explosión de la bomba. Es decir, la mecánica cuántica permite obtener información a partir de hechos *contrafácticos*, esto es, de hechos que pudieran haber sucedido pero no han sucedido.

Coloquemos la bomba en el extremo inferior derecho del interferómetro Mach-Zehnder, donde se encontraba el espejo en la versión de Elitzur y Vaidman. Si la bomba es defectuosa, su espejo está inmóvil, en una posición fija, lo que corresponde a la situación típica del interferómetro, sin ningún objeto interpuesto en los caminos por donde se puede desplazar el fotón. Por tanto, el fotón saldrá por el detector D_1 , donde se da interferencia constructiva.

Esta situación se muestra en el siguiente esquema, que representa el fotón que entra por el extremo izquierdo, se divide en dos componentes que se reflejan en los espejos y se vuelven a reunir posteriormente, provocando interferencia destructiva en D_2 e interferencia constructiva en D_1 .



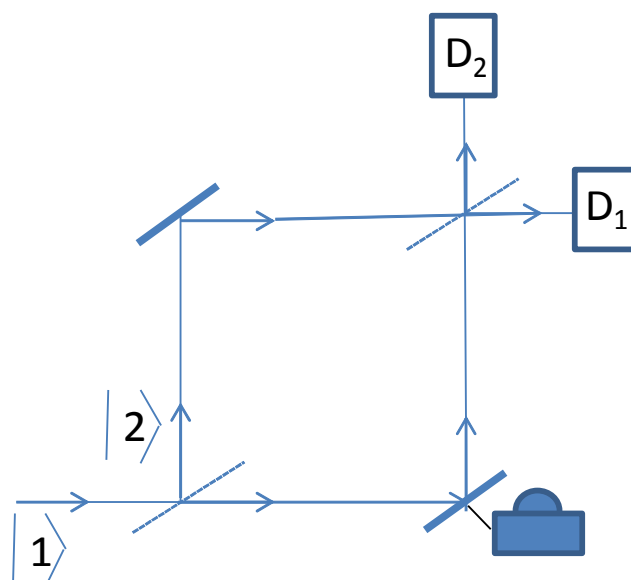
(Fig. 8.2)

En cambio, si la bomba no es defectuosa, hay dos posibilidades:

1) Que el fotón pase por el camino en que se encuentra la bomba, el fotón choque con el espejo, éste responda al impulso del fotón y la bomba explote.

2) Que el fotón vaya por el otro camino. Entonces el estado del fotón se reduce a $i|2\rangle$, que choca con el espejo del extremo superior izquierdo y se refleja como $-|1\rangle$. Después de encontrarse con el último divisor de haz el estado del fotón se convierte en $-|1\rangle - i|2\rangle$, lo que significa que el fotón tiene igual probabilidad de salir por el detector D_1 que por el D_2 , porque la propiedad relativa de las dos posibilidades es $|1|^2 : |i|^2 = 1:1$. Por tanto, que el fotón salga por el detector D_2 , que es el que habitualmente está a oscuras, indica que la bomba no es defectuosa. Se ha llegado a saberlo sin que haya explotado. Se ha conseguido realizar una observación sin interacción.

Esta situación se representa en el esquema siguiente, donde se muestra la bomba unida al espejo móvil del extremo inferior derecho.



(Fig. 8.3)

Como se puede ver, este experimento que expone Penrose es como el primer experimento de EV, pero en lugar de tener el objetivo de saber si hay un objeto sin que el fotón incida sobre él, tiene el objetivo de saber, entre un conjunto de bombas, si la bomba no es defectuosa. En esencia ambos experimentos son el mismo, puesto que en el experimento de Penrose el hecho de que la bomba esté en mal estado corresponde al hecho de que no haya objeto en el primer experimento de Elitzur y Vaidman, ya que la bomba defectuosa constituye simplemente uno de los espejos fijos del interferómetro cuando éste no contiene ningún objeto interpuesto. Por otra parte, la bomba no defectuosa equivale al objeto (por ejemplo, la lámina) que interpone Renninger en el experimento que presentó en 1953. Renninger ya ve que hay una probabilidad de $\frac{1}{4}$ de saber que hay un objeto interpuesto sin que el fotón choque con él. Como también lo ven Elitzur y Vaidman y Penrose. Además, estos últimos ven que si se reintroducen en el interferómetro los fotones que han salido por D_1 la probabilidad de éxito puede llegar a $\frac{1}{3}$.

Por otro lado, el recurso al espejo móvil –que aquí se encuentra unido a la bomba-- aparecía ya en el experimento de Epstein que hemos visto. Allí de la observación de que el espejo M_1 retrocedía se concluía que el fotón se encontraba en el haz S_1 , es decir, en el camino en que se hallaba dicho espejo; pero de la observación que no retrocedía se concluía que el fotón estaba en el otro camino, el de S_2 . Es decir, la falta de respuesta del espejo móvil, o sea, lo que posteriormente se denominó “experimento de resultado negativo”, permitía tener la seguridad de que el fotón había pasado por el otro camino. Se obtenía información a partir de un hecho contrafáctico.

La concepción de que no sólo es significativo que el espejo retroceda sino también que no retroceda, cuando puede hacerlo, proviene, según Epstein, como hemos visto, de Bohr¹²²⁷. Y también hemos visto que constituye la respuesta que, como propia de la interpretación de Copenhague, ofrecía Heisenberg a Renninger ante su experimento de medida “negativa” del artículo de 1960. Según Heisenberg, la posibilidad de que el fotón interfiriera con la primera pantalla ya constituía una interferencia, puesto que si no hubiera la posibilidad de que el fotón chocara con ella no se daría el colapso que provoca el cambio del vector de estado del fotón.

8.3 LOS EXPERIMENTOS DE HERZOG, KWIAT, WEINFURTER Y ZEILINGER

Posteriormente, en 1995, T.Herzog, P.Kwiat, H.Weinfurter y A.Zeilinger¹²²⁸ efectuaron en el laboratorio la versión real del experimento mental de Elitzur y Vaidman. Así mostraron que es posible construir aparatos que midan sin interacciones y también se plantearon el reto de superar la probabilidad de éxito predicha por Elitzur y Vaidman. Lo consiguieron cambiando el diseño para aplicar el efecto Zenón cuántico, que ya había sido estudiado exhaustivamente en 1977 por B.Misra y E.C. Sudarshan.

8.3.1 El efecto Zenón cuántico

El efecto Zenón cuántico implica realizar repetidas medidas cuánticas para inhibir la evolución de un sistema cuántico. Se basa en el postulado del colapso, también denominado de reducción o de proyección¹²²⁹, según el cual para cada una de las medidas de un sistema cuántico sólo son posibles unos resultados determinados. La idea básica del efecto Zenón cuántico es que un sistema cuántico puede quedar atrapado en su estado inicial, aunque si no se interviniese el sistema evolucionaría hacia otro estado. Si se mide el estado de un sistema cuántico suficientemente a menudo y de forma suficientemente rápida el sistema permanecerá en ese estado y nunca evolucionará hacia otro estado. Se denomina “efecto Zenón cuántico” recordando la paradoja planteada por el filósofo presocrático Zenón de Elea que negaba la posibilidad de que una flecha en vuelo se moviera realmente, porque mantenía que en cada instante de su trayectoria la flecha permanecía inmóvil.

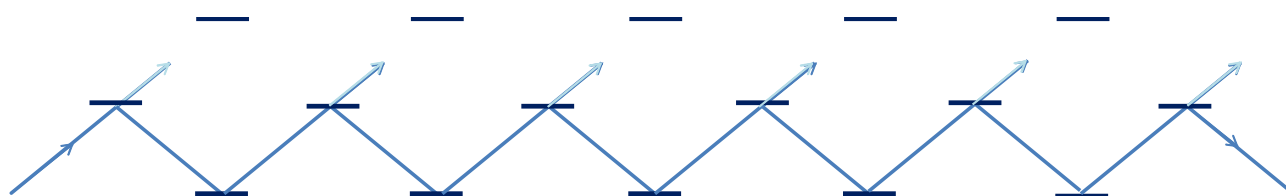
1227P.S.Epstein, *The Reality Problem in Quantum Mechanics* (1945), *Ibid.* (p.134)

1228P.Kwiat, H.Weinfurter y A.Zeilinger, *Visión cuántica en la oscuridad*, *Investigación y Ciencia*, enero 1997

1229Ver el apartado del problema de la medida en este capítulo de este trabajo

Así, Herzog, Kwiat, Weinfurter y Zeilinger, gracias al “efecto Zenón cuántico”, pudieron mejorar la eficiencia del montaje de Elitzur y Vaidman. Estos autores, en 1995, aplicaron¹²³⁰ dicho efecto realizando un proceso de interrogación repetida en un montaje, que se muestra en la figura 8.4, en el que se habían colocado N divisores de haz en los cuales la probabilidad R de que el fotón fuera reflejado era muy superior a la probabilidad de que el fotón fuera transmitido.

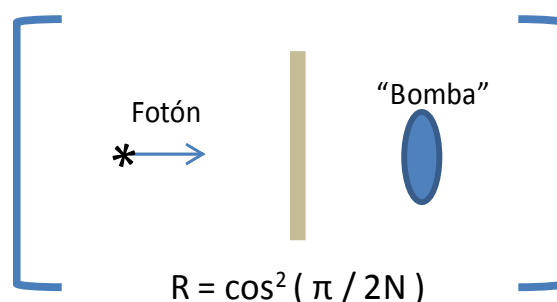
La reflectividad R de cada uno de los N divisores de haz es $R = \cos^2 \pi / 2N$ y en la parte superior del sistema se ha insertado una serie de detectores, que constituyen en conjunto el objeto interpuesto o la bomba introducida de Elitzur y Vaidman. En cada divisor de haz de este dispositivo se da sólo una probabilidad muy pequeña de que el fotón se transmita por la parte superior de los interferómetros y detone e ilumine un detector y una gran probabilidad, que es igual a $\cos^2 \pi / 2N$, de que se refleje y vaya por la parte inferior. Por consiguiente, el hecho de que un detector no se ilumine, es decir, la medida de un detector sea un resultado negativo, proyecta el estado a la parte inferior. El mismo proceso se va repitiendo y después de N ciclos la probabilidad de que el fotón sea encontrado en la parte baja –que indica que en la parte superior hay un detector con el que el fotón no ha interactuado– es $[\cos^2 \pi / 2N]^N$, probabilidad que cuando N es un número elevado es $1 - \pi^2 / 4N$, que si $N \rightarrow \infty$ entonces tiende a 1.



(Fig. 8.4)

Este esquema puede implementarse a la práctica en una nueva situación en la que la anterior serie de detectores, los objetos absorbentes o la bomba de Elitzur y Vaidman, sea un único objeto. Imaginemos dos cavidades idénticas separadas por un divisor de haz de reflectividad $R = \cos^2 (\pi / 2N)$, siendo N el número de veces que un fotón que se encuentre inicialmente en la cavidad izquierda incida en el divisor de haz.

1230P.Kwiat, H. Weinfurter, T. Herzog y A. Zeilinger, “IFM”, *Physical Review*, **74**, 24 (12 June 1995)



(Fig. 8.5)

Si no hay ningún objeto en la cavidad derecha, después de incidir N veces el fotón en el divisor de haz, éste será localizado en dicha cavidad. Pero si hay un objeto en la cavidad derecha y se incrementa N y, por tanto, también R , entonces se aumenta la probabilidad de que el fotón se refleje continuamente y, por consiguiente, permanezca en la cavidad izquierda. Entonces el detector de la cavidad izquierda se ilumina constantemente y la probabilidad de detectar el objeto sin que el fotón interfiera con él se acerca al 100%.

Mas imaginemos que, en lugar de un objeto macroscópico, en la cavidad derecha hay un átomo que puede estar en dos situaciones opuestas, puesto que puede encontrarse en un determinado estado A o no encontrarse en dicho estado A . Entonces, similarmente a los casos anteriores, hay tres posibilidades. Una posibilidad es que el fotón que, desde la cavidad izquierda, incide en el divisor de haz se transmita a la cavidad derecha; entonces será absorbido por el átomo, que abandonará el estado A y pasará a un nuevo estado B ¹²³¹ (hecho que equivale a la detonación de la bomba del experimento de Elitzur y Vaidman). Este fenómeno nos muestra que el átomo se encontraba en el estado A pero no es IFM, puesto que el fotón ha sido absorbido por el átomo.

Otra posibilidad es que el fotón, después de N incidencias, se transmita a la cavidad derecha pero el átomo no pase al estado B ; no es lo que se busca porque el objetivo es saber si el átomo se encontraba en el estado A . Y la tercera posibilidad es que el fotón, después de N ciclos, se refleje y permanezca en la cavidad izquierda, lo cual significa que el átomo estaba en el estado A . Es el IFM.

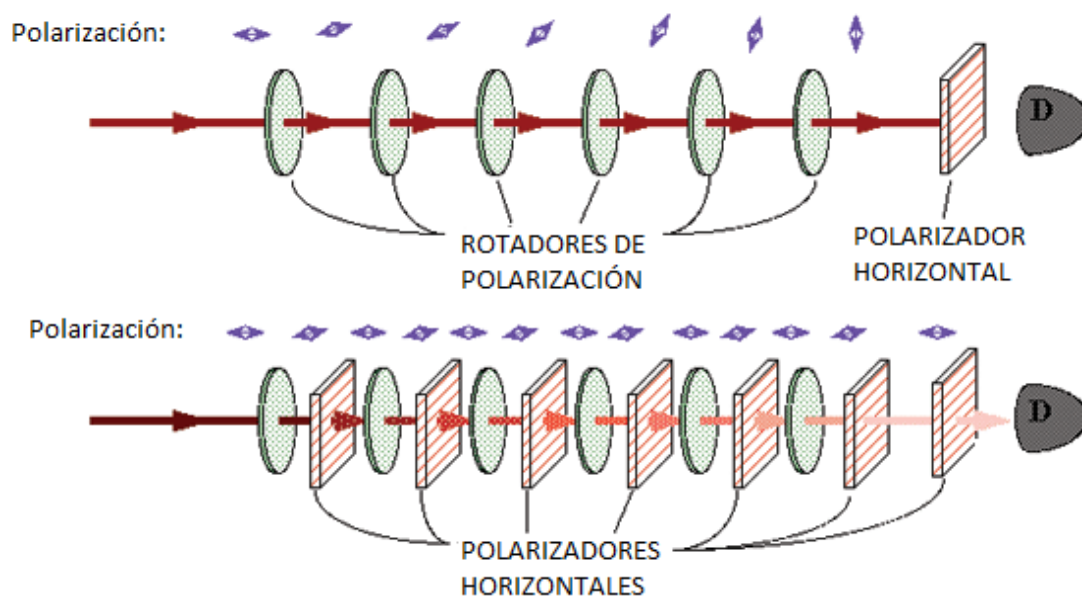
Como vemos, estos autores muestran que a través de N ciclos, es decir, con técnicas de N reiteradas

¹²³¹En el ejemplo que describen los autores el átomo, al absorber el fotón, dejará el estado A , pasará al estado B y de éste decaerá rápidamente al estado C

“interrogaciones”, se puede conseguir una eficiencia¹²³² cercana al 100% . Y muestran también que, debido al isomorfismo de todos los sistemas de dos niveles, es posible aplicar dichas técnicas a cualquier esquema de dos niveles, de dos alternativas. Así las hemos aplicado a la situación de si hay un objeto (una bomba) o no, a la situación de si un átomo está en un determinado estado o no. Por consiguiente, pensamos que se podría n aplicar también a la computación cuántica.

8.3.2 Aplicación a la polarización de la luz

Herzog, Kwiat, Weinfurter y Zeilinger, siguiendo la idea de M.A.Kasevich, también aplicaron¹²³³, en 1995, el efecto Zenón cuántico a la polarización de la luz¹²³⁴. Su aplicación se puede apreciar en el montaje que se representa en la siguiente figura:



(Fig. 8.6)

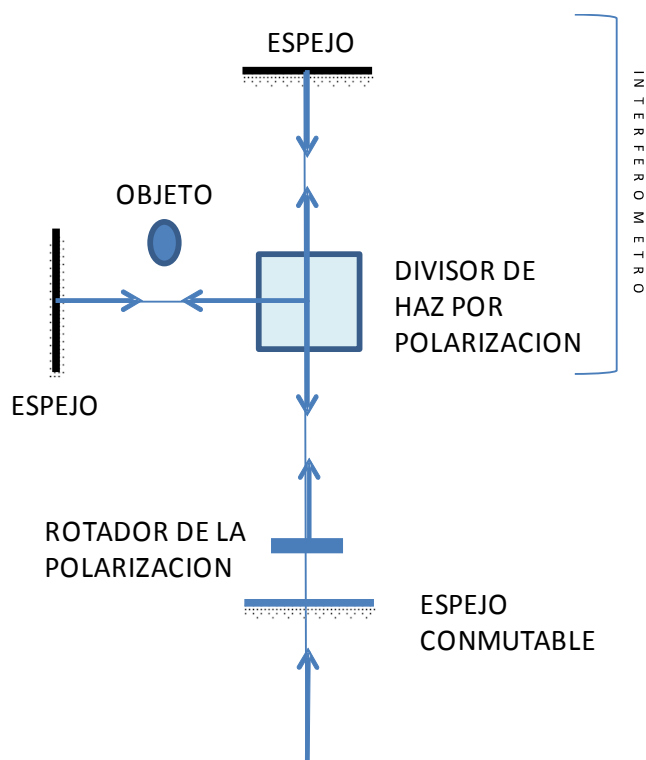
1232Definiendo la eficiencia $\eta = P(\text{det}) / P(\text{det}) + P(\text{abs})$, siendo $P(\text{det})$ la probabilidad de detectar la presencia del objeto sin interacción y $P(\text{abs})$ la probabilidad de que el fotón sea absorbido por el objeto, es decir, de que la bomba estalle .

1233P. Kwiat, H. Weinfurter y A.Zeilinger, Visión cuántica en la oscuridad, *Investigación y ciencia*, enero de 1997

1234La polarización es la dirección en la que oscilan las ondas de luz --arriba y abajo para la luz polarizada verticalmente, de lado a lado para la polarizada horizontalmente-- siempre en ángulo recto con la dirección de la propagación de la luz

El procedimiento es el siguiente: Se envía un fotón con polarización horizontal a través de, por ejemplo, una serie de 6 rotadores; si cada rotador gira la polarización 15° , tras pasar por todos los rotadores su polarización habrá girado 90° (15° por cada uno de los 6 rotadores) y se habrá convertido en polarización vertical. En el extremo del trayecto se encuentra un polarizador, que es un dispositivo que absorbe los fotones con polarización vertical y deja pasar los fotones con polarización horizontal. Por tanto, del polarizador final no saldrá ningún fotón. Pero si se intercala un polarizador tras cada rotador se evita que la polarización del fotón gire.

Aquellos autores construyeron un dispositivo que combinaba los montajes del efecto Zenón cuántico y del procedimiento original de Elitzur y Vaidman, que podía considerarse un híbrido de ambos procedimientos, con el objetivo de detectar de manera eficaz, es decir, con gran probabilidad de éxito, un cuerpo opaco sin que con él chocara ningún fotón. En este nuevo dispositivo hay, como muestra la siguiente figura, en un extremo un rotador de la polarización, que gira varias veces la rotación del fotón, y en el otro extremo se encuentra un interferómetro de polarización, que consta de un divisor de haz por polarización y dos caminos interferométricos de la misma longitud en cuyos extremos se hallan unos espejos.



(Fig. 8.7)

Así, el divisor de haz por polarización transmite toda la luz con polarización horizontal y refleja la que tiene polarización vertical. Es un divisor de haz y, por consiguiente, desempeña la función del divisor de haz del interferómetro de Renninger (1953) y de Elitzur y Vaidman (1993), que separa el haz de fotones en dos partes, el haz transmitido y el reflejado¹²³⁵. Si no hay un objeto interpuesto, la luz se divide en el divisor de haz según sea su polarización, se transmite cada componente por un camino del interferómetro, se refleja en los espejos que hay en los extremos de cada camino y vuelve al divisor de haz, que la recombina.

El procedimiento consiste en introducir un fotón polarizado horizontalmente y hacerlo pasar varias veces por un rotador. Entonces el resultado a la salida es que la polarización final es vertical. Pero si hay un objeto interpuesto en uno de los caminos la polarización final continua siendo horizontal; ello es debido al efecto Zenón cuántico, puesto que el objeto no ha absorbido el fotón, que ha ido por el otro camino, por donde ha pasado varias veces a través de un rotador y un polarizador (es como si estuvieran intercalados los polarizadores de la figura anterior del efecto Zenón.)

Por consiguiente, si a la salida vemos que la polarización es horizontal es que hay un bloqueador en el interferómetro. Si no, el fotón habría estado polarizado verticalmente. Así, la probabilidad de éxito, de que el resultado sea seguro, aumenta con el número de veces que se hace pasar el fotón por el rotador.

9. CONCLUSIÓN DEL CAPÍTULO

Hemos visto que los primeros experimentos de IFM fueron diseñados por Renninger motivado por algunas de las tesis de Bohr, Heisenberg y Jordan que forman parte del núcleo de la interpretación dominante de la mecánica cuántica, en la línea de las objeciones que Einstein, Schrödinger y de Broglie presentaban a dicha interpretación. Pero modesta y cautelosamente Renninger no presenta sus experimentos como una objeción sino sólo como una aportación, unos descubrimientos cuyas implicaciones se han de tener en cuenta al interpretar el formalismo cuántico.

Así, con el experimento de 1960, Renninger vemos que no pretende eludir las relaciones de

¹²³⁵También como la lámina semiplataada que, en el experimento de Epstein(1945), divide la onda en dos

indeterminación, como intentó hacer Einstein¹²³⁶, quien diseñó experimentos mentales que le permitieran medir con precisión las propiedades de los objetos. Y de hecho Renninger utiliza explícitamente las relaciones de indeterminación en su exposición del desarrollo de sus experimentos. Lo que él rechaza, y así lo manifiesta en el artículo de 1960, es la justificación que ofrecen Bohr¹²³⁷ y Heisenberg¹²³⁸ de dichas relaciones, una justificación que se basa en la perturbación del dispositivo sobre el sistema medido. Como alternativa, Renninger¹²³⁹ propone una justificación que califica de realmente fundamental, *wirklich tragende*, que consiste en la influencia, *in der Einwirkung*, que toda la materia, tanto la del entorno cercano como la del entorno lejano, ejerce sobre el sistema. Entendemos esta explicación de forma que, en la IFM, toda la materia del alrededor, de una manera general e indefinida que Renninger no precisa, influye sobre la partícula observada, aunque ésta no sea perturbada.

Por otra parte, el ingenio y la agudeza que muestra Renninger al diseñar sus experimentos se muestra de nuevo cuando Elitzur y Vaidman diseñan un dispositivo casi idéntico al de Renninger(1953), sin saber nada del montaje de éste, y posteriormente cuando Herzog, Kwiat, Weinfurter y Zeilinger lo hacen realidad en el laboratorio y consiguen, aplicando el efecto Zenón cuántico, aumentar el rendimiento que según Renninger era de 25 % hasta cerca del 100%.

Por otra parte, la mirada filosófica de los trabajos de Renninger, que pretendía contribuir a la interpretación de las nociones fundamentales de la mecánica cuántica, la hemos encontrado esporádicamente en los trabajos que hemos consultado de sus continuadores, algunos de ellos conscientes de las implicaciones filosóficas que las IFMs pueden tener. Así Kwiat, Weinfurter y Zeilinger escriben, refiriéndose a las posibilidades tecnológicas de las IFMs: “Estas prestidigitaciones cuánticas ofrecen muchas ideas para la construcción de aparatos de detección útiles en el mundo real. Pero quizás revistan mayor interés las consecuencias filosóficas”¹²⁴⁰.

Así también, la raíz filosófica de la que nacen las IFM de Renninger de alguna manera permanece en la interpretación metafísica que Vaidman¹²⁴¹ ofrece de estos experimentos, a los cuales aplica la

1236Ver el apartado de la oposición Bohr-Einstein en el capítulo dedicado a la concepción filosófica de Bohr

1237N.Bohr , *El postulado cuántico y el desarrollo reciente de la teoría atómica* (p.100)

1238W.Heisenberg, *Física y filosofía* (p.38, 39)

1239M.Renninger, *Messungen ohne Störung des Mesobjekts* (1960)(p.1)

1240 P.Kwiat, H.Weinfurter, A.Zeilinger. *Visión cuántica en la oscuridad. Investigación y ciencia*, enero de 1997(p.2)

1241A.Elitzur y L.Vaidman, *Is it possible to know about something without ever interacting with it? Vistas in Astronomy*, 37 (1993) y L.Vaidman. *On schizophrenic experiences of the neutron or why we should believe in the many-worlds interpretation of quantum theory. International Studies in the Philosophy of Science*.1998, vol.12

interpretación de los muchos mundos. Esta interpretación surgió de la propuesta que ofreció Everett¹²⁴² en 1957, quien para solventar el problema del colapso, el gran problema de la teoría cuántica de la medida¹²⁴³, eliminó el colapso. Así, la solución everettiana fue mantener que cuando se realiza una medida todos los componentes de la superposición del vector de estado del objeto medido se conservan, es decir, todos los posibles resultados se hacen realidad. Aceptando la interpretación de los muchos mundos, Vaidman interpreta¹²⁴⁴ su experimento de la siguiente forma: cuando se introduce el fotón en el interferómetro en uno de cuyos brazos hay un objeto interpuesto hemos visto que se dan tres posibilidades: 1) que el fotón sea absorbido o dispersado por el objeto interpuesto y no llegue a los detectores finales, 2) que llegue al detector D_1 y 3) que llegue al detector D_2 . Las tres posibilidades se realizan, una en cada “rama”, que corresponde una a cada mundo. “En un mundo el fotón es dispersado por el objeto y en los otros dos mundos, no. Ya que todos los mundos tienen lugar en el universo físico, no podemos decir que nada haya 'tocado' el objeto. Obtenemos información sobre el objeto sin tocarlo en un mundo pero pagamos el precio de interactuar con el objeto en el otro mundo”¹²⁴⁵. Así pues, la IFM es IFM en nuestra ontología habitual según la cual sólo hay un mundo, no es IFM en la ontología de los muchos mundos. Pero aceptar la metafísica de los muchos mundos presenta muchos problemas. En primer lugar, sólo percibimos un resultado de la medida, es decir, una posibilidad hecha realidad, un mundo. En segundo lugar, nos planteamos las siguientes cuestiones: ¿cuál es el significado de la noción de probabilidad, el sentido de la interpretación estadística de Born?, puesto que ¿qué sentido tiene mantener que cada resultado tiene una probabilidad si todos los resultados se realizan? Y otro problema constituye la identidad personal, puesto que si cuando se realiza una medida hay una ramificación de mundos, entonces el observador también se ramifica en tantas copias descendientes¹²⁴⁶ como resultados posibles haya, lo cual lleva a preguntar ¿cuál de ellos mantiene la identidad del observador inicial? es decir, después de una medida ¿en qué mundo estoy? Pero esto constituiría otra investigación.

1242 Everett, “Relative state” formulation of quantum mechanics. *Reviews of Modern Physics*, 29, 1957

1243 Ver el apartado de la teoría de la medida de von Neumann al principio de este capítulo

1244 Ver apartado del experimento de Elitzur y Vaidman de este capítulo

1245 A. Elitzur y L. Vaidman, Is it possible to know about something without ever interacting with it? *Vistas in Astronomy*, 37 (1993) (p.255)

1246 Por esta razón, la interpretación de los múltiples mundos mantiene un postulado de autoprotección: cada rama del mundo está aislada de las otras ramas; y, en consecuencia, cada copia de la persona desconoce lo que le ocurre a las otras copias.

CONCLUSIONES FINALES

Finalmente, vamos a sintetizar las conclusiones más destacadas a las que hemos llegado a través de nuestra investigación respecto a los tres objetivos iniciales propuestos, que consistían en buscar el origen de las IFMs, el marco conceptual en el que surgieron y sus implicaciones filosóficas. En relación al primero de ellos, hemos hallado que el origen de las IFM se encuentra en el artículo de Renninger (1953), no en el de Renninger (1960), como se considera en la literatura del tema, puesto que en el experimento de 1953 el autor ya expone y muestra empíricamente que, al enviar fotones por el interferómetro, hay un 25% de posibilidades de que se detecte un objeto sin que interaccionen con él. Si no se ha reconocido el primer experimento como IFM y, en cambio, sí se ha reconocido el segundo es porque el primero no fue diseñado para realizar una medida sin interacción sino, como su autor manifiesta, para probar que la onda es una realidad física y el segundo sí fue pensado con este objetivo.

Buscar respuesta a la pregunta de por qué surgieron las IFMs de Renninger, tanto la de 1953 como la de 1960, nos llevó a explorar el contexto conceptual en el que nacieron. Al contemplar este contexto tomamos dos perspectivas diferentes. Por una parte, los autores citados por Renninger, las tesis que pretendía rebatir y las que pretendía probar nos llevaron al debate sobre la interpretación de la mecánica cuántica protagonizado por Bohr y Einstein que continuaba, en la época en la que Renninger publicó sus artículos, entre seguidores y oponentes de la interpretación de Copenhague. Por otra parte, el hecho de que los dos experimentos ofrecieran ejemplos concretos y diferentes de medidas sin interacción nos llevó a investigar en la dirección de los trabajos efectuados para construir una teoría cuántica de la medida, entre los cuales encontramos una referencia a Renninger(1960), por parte de Jauch, Wigner y Yanase; estos autores presentaron a Daneri, Loinger y Prosperi una objeción respecto a su modelo de la medida en el que la interacción del objeto atómico con el dispositivo constituye un desencadenante que provoca una respuesta macroscópica en el aparato, la cual produce en éste una evolución hasta la situación de equilibrio estable, que constituye el resultado de la medida; la objeción consiste en señalar que dicho modelo no es aplicable a la medida sin interacción que Renninger había presentado en 1960.

Pero es bajo la primera perspectiva, es decir, en el acercamiento al debate entre seguidores y oponentes de la interpretación de Copenhague donde encontramos el marco de las inquietudes intelectuales de Renninger al diseñar sus experimentos. Esto lo mantenemos por dos razones. La

primera es que éste cita a los principales creadores de aquella interpretación, Bohr y Heisenberg, estimulado por unas tesis con las que no está de acuerdo, como la complementariedad de la naturaleza ondulatoria y corpuscular de la luz y la justificación, basada en la interacción instrumento-objeto, de las relaciones de indeterminación. La segunda razón es que Renninger cita a los representantes de la oposición a la interpretación de Copenhague para manifestar la conformidad o la simpatía por algunas de sus tesis, como la sospecha de incompletud de la mecánica cuántica, la insuficiencia de la interpretación estadística según Einstein, el criterio de elemento de la realidad física de EPR y el modelo de onda guía de de Broglie. Por estas razones, una parte considerable de nuestra investigación ha estado dirigida a explorar el marco del debate filosófico en el que habían surgido las tesis que Renninger rechazaba y las que compartía, así como las implicaciones que comportaban, a través del estudio de la obra de los dos principales creadores de la interpretación de Copenhague, Bohr y Heisenberg, y la de dos de sus principales oponentes, Einstein y Schrödinger. Las conclusiones más destacadas a las que esta investigación ha llegado se pueden sintetizar en los puntos siguientes:

1) El debate que hemos estudiado es un debate de carácter filosófico mantenido, mayoritariamente, por físicos, que, aunque tenían a su alcance la misma información científica, trataban de problemas –los mismos problemas durante un largo período de tiempo, pues el inicio del debate Bohr-Einstein ya se sitúa en 1927– básicamente de carácter epistemológico, como la inteligibilidad y causalidad de los procesos atómicos, respecto a los cuales no era fácil llegar a un acuerdo, puesto que, por su carácter de totalidad, eran difíciles de resolver de una manera que fuera unánimemente aceptada, tanto por vía argumentativa como por vía experimental. Mas, a pesar de las dificultades, los físicos los intentaban resolver esgrimiendo argumentos que ilustraban con experimentos mentales. Así, a lo largo de nuestra investigación hemos encontrado la significativa presencia de los experimentos mentales, que desempeñaron una función relevante para justificar y refutar principios teóricos, como el microscopio de rayos γ de Heisenberg, el gato de Schrödinger y el amigo de Wigner. Constituyen recursos muy beneficiosos porque son intuitivos, *anschaulich*, tienen la preciada cualidad de la *Anschaulichkeit*, la visualización, puesto que están diseñados para presentar sólo las ideas esenciales del problema, –en este sentido son “ideales”–, sin dispersarse en detalles prácticos que hay que tener en cuenta para su realización efectiva pero que no son teóricamente significativos. Los experimentos mentales que los autores estudiados presentan ofrecen una claridad visual, una facilidad para ser imaginados, que psicológicamente nos ayuda a acercarnos al mundo atómico, que no podemos percibir con nuestros propios ojos. Los experimentos de Renninger

también son mentales y fueron diseñados para defender unas tesis filosóficas sobre el significado de la onda y la noción de medida sin interacción. Posteriormente fueron efectivamente realizados a la práctica por Herzog, Kwiat, Weinfurter y Zeilinger quienes, además, incrementaron el rendimiento, que en Renninger(1953) era del 25%, con la aplicación del efecto Zenón cuántico, llegando cerca del 100%; así, gracias al progreso tecnológico que significó el efecto Zenón cuántico, se consiguió casi la seguridad absoluta en las predicciones de las IFM. Vemos, pues, que, en las IFMs, filosofía, física y tecnología aparecen interrelacionadas y su entrelazamiento constituye una muestra del carácter unitario del conocimiento humano, que aparece también como trasfondo del debate.

2) En el debate que hemos estudiado hemos hallado también un entrelazamiento de posiciones, en dos sentidos de la expresión. En un primer sentido, puesto que a menudo los autores –como es el caso de Renninger– han escrito sus artículos y ensayos dirigiéndose a sus oponentes, especialmente motivados por sus anteriores manifestaciones. En otro sentido, puesto que también hemos percibido que Bohr, Heisenberg, Einstein y Schrödinger en sus obras no siempre muestran las posiciones típicas, los pensamientos estereotipados que la historia les ha atribuido, en un bando o el otro de la polémica. Estas oscilaciones y vacilaciones en los autores muestran el carácter especulativo de los temas que trataban, que eran básicamente los presupuestos epistemológicos de la mecánica cuántica, la interpretación de los fundamentos de esta teoría. Así, Heisenberg negaba que la causalidad fuera aplicable a los procesos cuánticos, por una parte, con el argumento de que las relaciones de indeterminación impedían conocer exactamente las condiciones iniciales de un objeto y, por otra parte, con el argumento de que las predicciones que se derivan de la ecuación de onda son probabilísticas; pero también admitía una causalidad restringida en los casos particulares en los que se conocen todos los datos de un sistema aislado en experimentos el resultado de los cuales puede ser exactamente predicho. Y Schrödinger descubrió una ley de evolución causal pero también defendió la acausalidad de Exner. Asimismo de las cuatro interpretaciones que Schrödinger ofreció de la onda a lo largo de su vida, tres son realistas y una es la concepción antirealista de la interpretación estadística. Y, por su parte, Renninger en su artículo de 1953 pretende probar un enunciado tan realista como que la onda es una realidad física y vemos también que, en el mismo trabajo, manifiesta que acepta la interpretación estadística de Born.

3) Uno de los cambios conceptuales que hemos observado en los autores ha sido su actitud respecto al pensamiento positivista de Mach, cuya huella permanece en el trasfondo y en el lenguaje del debate. Así, Einstein, Heisenberg y Schrödinger en su juventud, fueron influidos por éste y, en su

madurez, lo rechazaron. La cualidad que en un principio vieron, el criterio de que, para construir teorías científicas, sólo se habían de aceptar nociones observables, se convirtió en defecto, cuando consideraron que dicho criterio limitaba, inhibía, la inspiración creativa necesaria para llenar los huecos que los observables dejaban y de esta manera impedía construir relaciones que permitieran la comprensión de todas las experiencias, objetivo de la ciencia. Cuando Renninger pide que se tenga en cuenta su experimento IFM para que sea integrado en la interpretación de la mecánica cuántica está apelando a este espíritu creativo que permita al científico descubrir nuevas estructuras conceptuales para abarcar el mayor campo posible de observaciones experimentales.

4) Uno de los temas más debatidos es el realismo. Pero no es el realismo que se suele denominar “metafísico” y que hemos llamado, en este trabajo, “de entidad”, según el cual se acepta que existe una realidad exterior e independiente del sujeto cognoscente. La huella de Mach está presente en la negación de la posibilidad de responder a preguntas metafísicas como la de la existencia de la realidad. Heisenberg y Einstein lo recuerdan con frecuencia. No se puede probar con ningún experimento la existencia de la realidad completa, puesto que el posible experimento formaría parte de esta entidad cuya existencia se pretende verificar. Tampoco se puede demostrar la existencia de la realidad con argumentos racionales, puesto que el razonamiento que se impone es el siguiente: no es posible demostrar que la realidad que percibimos es una copia o un reflejo de una realidad original, puesto que no podemos comparar ambas realidades, ya que no tenemos manera de conocer dicha supuesta realidad original. Así, a partir de dicho argumento, los autores, en general derivan el agnosticismo respecto a la existencia de esta última entidad, conocida como realidad material. Mas hemos encontrado también esporádicas afirmaciones de duda respecto a la realidad de las entidades cuánticas, por ejemplo en el Heisenberg más positivista, que se han presentado como manifestaciones de un antirealismo metafísico. Pero, ante estas dudas, amplificadas en el debate, surge una cuestión: ¿si aceptamos las dudas podemos aceptar también que las cosas macroscópicas existentes están constituidas por entidades cuya realidad es dudosa, borrosa? Y surge también una observación obvia: todas las personas, incluso los idealistas como Berkeley, incluso los físicos positivistas cuando tratan de los electrones y otras partículas cuánticas, actúan aceptando, como el hombre de la calle, que la realidad material existe.

Sin embargo, por otra parte, Schrödinger, cuyo lenguaje también era realista, argumentaba, además, que si sólo estamos seguros de la existencia de la realidad percibida no necesitamos aceptar la existencia de ninguna otra entidad –ni, por tanto, de la realidad material– y así concluía aceptando

una metafísica monista.

Pero el realismo sobre el que se debate no es el realismo metafísico, el de entidad, sino el realismo epistemológico, según el cual podemos conocer la realidad; más particularmente, el que se debate es un realismo de teoría, según el cual las teorías científicas describen la realidad tal como es; no constituyen simples instrumentos para predecir y sistematizar observaciones; particularmente se discute si con la teoría es posible comprender los fenómenos cuánticos, es decir, si éstos son inteligibles, de la misma manera que se acepta que son inteligibles los fenómenos macroscópicos. Sobre este realismo epistemológico encontramos dos posiciones delimitadas, puesto que ante la cuestión de la inteligibilidad del mundo cuántico se presentan dos respuestas, la que, con Selleri¹²⁴⁷ podemos considerar pesimista –y bajo una perspectiva sociológica se relaciona con el ambiente pesimista de la época–, puesto que responde negativamente, y la que podemos considerar optimista, que responde positivamente. La primera respuesta, que encontramos en los textos de Bohr y Heisenberg, se basa fundamentalmente en que el orden de magnitud de las cantidades cuánticas hace que la interacción entre el dispositivo de observación y el objeto observado no sea despreciable ni controlable; es decir, en síntesis, rigurosamente hablando, según estos dos autores, no podemos decir que es posible conocer el mundo cuántico porque al intentar conocerlo lo perturbamos tanto que lo desfiguramos. En cambio, Einstein y Schrödinger ven esta perturbación desde otra perspectiva más esperanzadora: los descubrimientos de la mecánica cuántica no dan suficientes motivos para abandonar los principios básicos sobre los que se ha construido la poderosa física clásica, que son la inteligibilidad y la objetividad del mundo. Los nuevos descubrimientos exigen transformaciones en los esquemas conceptuales de nuestra imagen del mundo para llenar los huecos que deja la teoría cuántica –como dice Schrödinger refiriéndose al vacío que dejan las relaciones de indeterminación de Heisenberg–, pero no requieren renunciar a los fundamentos de la ciencia natural; porque, sin el supuesto de que se puede entender la realidad objetivamente, no habría ciencia. Así también, el descubrimiento de las IFM por parte de Renninger requiere una transformación en el esquema conceptual de la interpretación de la mecánica cuántica con el fin de integrarlas y comprenderlas. Las IFMs constituyen fenómenos empíricos comprobados. Una teoría completa no debe obviarlos.

Renninger acepta los supuestos realistas de los defensores del realismo de teoría. Pero no los argumenta. Simplemente los acepta, como hace el físico clásico. Las razones que presentaban los

1247F.Selleri, *El debate de la teoría cuántica*

defensores del realismo de teoría que hemos estudiado, que son Schrödinger y especialmente Einstein, son de índole psicológico, emocional. Según estos autores, es motivador para el científico asumir que con su trabajo se está acercando al conocimiento objetivo de una realidad, que es inteligible, y esta motivación no existe si el científico no acepta los presupuestos realistas. La prueba que ofrecen es el éxito de la física clásica, basada en dichos supuestos realistas. Y el progreso de la física constituye para ellos una prueba del realismo porque aceptan que si una teoría no representara la realidad no tendría éxito, porque constituiría un milagro que, sin reflejar la realidad tal como es, permitiera explicar los hechos observados en dicha realidad y realizar predicciones adecuadas sobre hechos observables en un futuro. No obstante, con el paso de los años, hemos visto que, como señalan Fine y Stapp¹²⁴⁸, aunque la interpretación de Copenhague se impuso y ésta se basa en supuestos instrumentalistas y positivistas que provienen de manifestaciones de Bohr y de Heisenberg, la mecánica cuántica, con la interpretación de Copenhague, también ha cosechado grandes éxitos. Mas estos éxitos podemos verlos como éxitos de las leyes estadísticas de la mecánica cuántica. Se habría de valorar también el poder explicativo de la teoría. Y, en general, podemos decir que, si bien el debate entre la posición que mantiene que todas las teorías han de ser realistas o no lo han de ser no es fructífero, sí lo es, en cambio, el debate de si un determinado modelo teórico tiene el objetivo de representar la realidad o el de ser simplemente un recurso instrumental para hacer predicciones.

5) Otro de los temas que fue objeto prioritario de debate es la aplicabilidad de la relación de causalidad para la representación de los procesos atómicos. La posición de los seguidores de la interpretación de Copenhague es negativa y, según la perspectiva sociológica, ello se relaciona con el escepticismo y el pesimismo del ambiente intelectual de la época en la que surgió dicha interpretación; esta postura acausal se basa en el siguiente argumento que ofrece Bohr: el postulado cuántico implica que toda observación provoque una interacción entre dispositivo y objeto que impide definir el estado del objeto y, por consiguiente, la evolución posterior de éste. La causalidad a la que renuncia Bohr –y con él la interpretación dominante de la mecánica cuántica– es la propia del determinismo, la que había asumido la física clásica. Esta causalidad, esencial para el poder explicativo de la física clásica, hemos encontrado que es reemplazada por dos concepciones. La primera es la amplia noción de complementariedad que propuso Bohr y que fue rechazada por los oponentes a la interpretación de Copenhague por considerar que su vaguedad e imprecisión no son propias del espíritu científico. La segunda es la concepción estadística, una concepción que se ha

1248A. Fine, *The Shaky Game*. H. Stapp, *The Copenhagen Interpretation*

mostrado extremadamente útil y ha contribuido en gran medida a los éxitos de la mecánica cuántica. Heisenberg también negaba la aplicabilidad de la causalidad al dominio cuántico; uno de sus argumentos era muy similar al de Bohr. Así, Heisenberg manifestaba que las relaciones de indeterminación impiden conocer las condiciones iniciales del objeto y, por consiguiente, también impiden conocer la evolución posterior de éste. Y la justificación que Heisenberg ofrecía a sus relaciones de indeterminación era la interacción entre el dispositivo de observación y el objeto observado.

En cambio, los oponentes a la interpretación de Copenhague no niegan la aplicabilidad de la relación de causalidad al dominio atómico. El representante más claro de esta posición, entre los autores estudiados, es Einstein, puesto que, como hemos visto, Schrödinger, aunque creó una ecuación a la que se ha dado una interpretación causal, defendió el indeterminismo y Renninger asumió la noción de causa en su experimento de 1953 para demostrar la realidad de la onda, sin argumentar a favor de dicha noción. La argumentación de Einstein a favor de la noción de causalidad era similar a la que daba para defender las teorías realistas. Así, según Einstein, los descubrimientos de la teoría cuántica –como la interacción a la que se referían Bohr y Heisenberg-- no ofrecían suficientes motivos para renunciar al principio clásico de la causalidad, que permitía que el mundo fuera inteligible. Lo que sí pueden hacer los nuevos descubrimientos es estimular a pensar en nuevas concepciones de la causalidad que permitan entender los procesos cuánticos. Según la perspectiva einsteniana, la descripción estadística de los fenómenos atómicos que ofrece la interpretación dominante no puede ser definitiva, porque emocionalmente no nos podemos conformar con ella, puesto que no permite entender dichos fenómenos y, por esta razón, no satisface nuestra ansia natural de conocimiento inteligente, de comprensión del mundo. Asimismo, hemos visto que ésta es también la actitud de Renninger, quien acepta la interpretación estadística de la onda pero no renuncia a una interpretación realista de ella. Pensamos que la descripción estadística de los fenómenos cuánticos, aunque sea adecuada porque ofrece predicciones verificables, no ha de impedir buscar nuevos modelos de explicación que sean más completos y más intelectualmente satisfactorios, que expliquen el porqué de cada fenómeno, puesto que un objetivo fundamental de la ciencia es ofrecer una imagen del mundo que permita entender todos los fenómenos que percibimos.

6) Finalmente, bajo un punto de vista diferente, queremos señalar, incidentalmente, que en la lectura de los textos de los cuatro creadores de la mecánica cuántica que hemos estudiado hemos percibido

que todos ellos son físicos filósofos, en el sentido de que se interesan por los temas especulativos que tradicionalmente se han considerado filosóficos. Así no sólo buscan dotar de un significado al formalismo cuántico, como hemos visto a lo largo de este trabajo, sino también se alejan del ámbito científico y amplían el alcance de los descubrimientos de la mecánica cuántica al amplio dominio de las humanidades. Así pues, Bohr , basándose en el carácter unitario del saber, extiende su noción de complementariedad al ámbito de la psicología y la antropología, donde proponemos que se mantenga y se confine. Y también Bohr, basándose en el postulado cuántico, que implica una interacción inevitable entre instrumento y objeto, llega a la concepción de la unidad indivisible de sujeto observador y objeto observado, que le conduce a una visión holística del todo. Por otra parte, Schrödinger realiza su aportación al eterno problema del libre albedrío argumentando que es pura ilusión la tesis según la cual la libertad humana es consecuencia del indeterminismo cuántico. Además, hemos visto que él mismo manifiesta que su monismo es cercano al monismo védico. Por todo ello, sugerimos que el halo de misticismo que ha rodeado y sigue rodeando a muchas de las divulgaciones y presentaciones populares de la mecánica cuántica está muy condicionado por estas “incursiones” de algunos de sus creadores en dominios muy alejados de su trabajo científico especializado. No obstante, cabe señalar que ello no disminuye el interés intrínseco que presentan muchas de estas incursiones.

Respecto al tercer objetivo de nuestra investigación, que era analizar las implicaciones filosóficas de las IFM, hemos descubierto que éstas se dirigen directamente al corazón de la interpretación de Copenhague, puesto que muestran experimentalmente –es decir, a través de fenómenos empíricos que ningún positivista puede negar, porque son observables– que existen medidas en las que el objeto no es perturbado. La interacción entre el dispositivo de medida y el sistema medido está en el centro de dicha interpretación, que, como hemos visto, proviene del pensamiento de Bohr y Heisenberg. Así, en sus textos se encuentran reiteradamente referencias a la interacción entre instrumento y objeto, noción que desempeña una función esencial en su pensamiento. Veamos por qué.

Por una parte, las relaciones de indeterminación de Heisenberg se justifican con la inevitable interacción¹²⁴⁹ entre instrumento de medida y objeto medido, que, por las dimensiones propias de los fenómenos atómicos, en el dominio cuántico nunca es controlable ni despreciable, como se ve a través del experimento mental del microscopio de rayos γ . Por otra parte, esta interacción tiene

1249W.Heisenberg, *Física y filosofía* (p. 38, 9)

“consecuencias trascendentales”¹²⁵⁰, según expresión de Bohr, porque impide definir el estado del objeto y esto impide ofrecer de él una descripción causal y una descripción espacio-temporal, como presenta la física clásica. Ya hemos visto que la renuncia a la causalidad afecta a nuestra fe en la inteligibilidad de la naturaleza. La renuncia a la descripción espacio-temporal también afecta a nuestra comprensión del mundo porque siempre hemos situado los fenómenos que percibimos en las coordenadas de espacio y tiempo y no sabemos orientarnos de otro modo. Así pues, la interacción entre instrumento y objeto es tan significativa que lleva a Bohr a dudar de los supuestos realistas de la física clásica, la cognoscibilidad, la inteligibilidad, la objetividad y la causalidad. La interacción limita la posibilidad de conocer objetivamente el mundo cuántico y la posibilidad de comprenderlo estableciendo relaciones causales entre sus fenómenos. La interacción provoca la indisolubilidad de la unidad entre sujeto y objeto. Debido a la interacción, la noción de observación de la física clásica es completamente alterada en la teoría cuántica y es la responsable de que diferentes experimentos ofrezcan descripciones diferentes y excluyentes, es decir, complementarias, del mismo objeto. Así, de la noción cuántica de observación surgía la lección epistemológica que la teoría cuántica ofreció a Bohr. Pero el descubrimiento de las IFMs por parte de Renninger había mostrado que no siempre que se da una observación se da también una interacción.

Respecto a nuestra tesis enunciada en la introducción, vemos, por los resultados de nuestra investigación expuestos, que el origen de las IFMs se sitúa en el debate sobre la interpretación de los fundamentos de la mecánica cuántica y tiene profundas implicaciones filosóficas en dicha interpretación. Finalmente vamos a ver que las IFMs implican la pertinencia de revisar la justificación de enunciados fundamentales que Bohr y Heisenberg transmitieron a la interpretación de Copenhague.

Así, por una parte, la existencia de las IFMs habría de llevar a reconsiderar si la justificación de las relaciones de indeterminación de Heisenberg puede basarse, como se ha hecho, en la interacción entre el instrumento de medida y el objeto medido, puesto que la experiencia muestra que hay medidas que no presentan dicha interacción. Y, por otra parte, por la misma razón, también habría de revisarse si la justificación de la renuncia a principios de la física clásica, como la cognoscibilidad, la inteligibilidad, la objetividad y la causalidad de la naturaleza, puede basarse, como también se ha hecho, en dicha interacción. En síntesis, habría de considerarse la posibilidad de que las IFMs formaran parte de la lección epistemológica que los descubrimientos cuánticos

1250N. Bohr, *El postulado cuántico y el desarrollo reciente de la teoría atómica* (p.100)

ofrecen.

Por otra parte, cabe señalar que este trabajo de investigación deja diversas preguntas abiertas. Así, un problema que hemos visto que en el artículo de 1953 queda sin resolver es: ¿qué ocurre con la onda desprovista de energía del fotón cuando éste ha sido absorbido? Y otra cuestión que nos preguntamos, por lo que sugiere de Baere¹²⁵¹, es la siguiente: ¿se mantiene actualmente la interpretación de Copenhague entre los físicos y los filósofos de la ciencia que se dedican al estudio de las IFMs? Por otra parte, han surgido nuevos fenómenos como, por ejemplo, la aplicación de las IFMs a la Computación Cuántica, CFC, que según Hosten *et al.*¹²⁵² permite obtener el resultado de un algoritmo sin, de hecho, hacerlo funcionar y estos avances abren una nueva línea de investigación ante nosotros. Así, queda abierta la cuestión de cuál es el marco de referencia más adecuado para interpretar los experimentos de IFM y de CFC: ¿es, como mantiene Vaidman¹²⁵³, la interpretación de los múltiples mundos, según la cual cada componente del vector de estado existe en un mundo? ¿es, como mantienen Bub¹²⁵⁴ y Grinbaum¹²⁵⁵, la interpretación del intercambio de información, según la cual lo que representa el vector de estado no es el estado del objeto, sino la información que de él podemos tener?

Con nuestro trabajo hemos pretendido poner de manifiesto el valor de los dos artículos de Renninger, el de 1953 y el de 1960, puesto que en ellos éste muestra ingenio para diseñar nuevos experimentos, penetración para interpretar los resultados, congruencia para extraer conclusiones y coraje intelectual para salir del dominio de su especialidad –donde su trabajo en cristalografía era ampliamente reconocido– y presentar ante los físicos teóricos de mayor prestigio –algunos de ellos premiados con el Nobel–, sus descubrimientos, que excluían tesis en que algunos de ellos habían insistido, como la complementariedad y la inevitabilidad de la interacción entre el dispositivo y el objeto.

Así, hemos visto el largo alcance epistemológico de los descubrimientos de Renninger, puesto que la interpretación dominante, basada en la aportación de Bohr y Heisenber, incidía especialmente en

1251W.De Baere. Reality and Locality in Quantum Mechanics. *AIP Conference Proceedings*. Melville, New York, 2007, vol.962

1252O.Hosten *et al.* Counterfactual quantum computation through quantum interrogation. *Nature*, 2006, vol.439

1253L.Vaidman. On schizophrenic experiences of the neutron or why we should believe in the many-worlds interpretation of quantum theory. *International Studies in the Philosophy of Science*. 1998, vol.12

1254J.Bub. Why the quantum? *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*. 2004, vol. 35B

1255A.Grinbaum, A. Elements of information-theoretic derivation of the formalism of quantum theory. *International Journal of Quantum Information*. 2004, vol.3

la inevitable perturbación del proceso de observación sobre el objeto observado y la responsabilizaba de las “deficiencias” que sufría la teoría cuántica en comparación con la física clásica, como la indeterminación en la medida y la imposibilidad de mantener la objetividad, la representabilidad espacio-temporal, la visualización y la causalidad. Renninger muestra empíricamente que dicha perturbación no es inevitable y ello implica la necesidad de revisar la renuncia a dichos principios, los cuales constituyen unos supuestos tan esenciales para la ciencia natural que plantean la cuestión de si ésta, sin ellos, es posible.

Por otra parte, la repercusión tecnológica de las IFMs que Renninger descubrió intuimos que también va a ser de largo alcance. Como manifiestan Kwiat, Weinfurter y Zeilinger¹²⁵⁶, se han empezado a aplicar en el procesamiento cuántico de la información y se pueden aplicar también en fotografía como un medio de obtener imágenes de objetos sin exponerlos a la luz. Estamos en una situación similar a la de los primeros años del láser en que se intuía que éste resolvería muchos problemas prácticos, aunque no se supiera exactamente cuáles serían éstos. Así, es concebible que las IFMs sean útiles en medicina, puesto que podemos pensar que en un futuro permitan detectar elementos –como los objetos interpuestos en los brazos del interferómetro– del interior del cuerpo de un ser vivo sin que la radiación incida sobre ellos. Los experimentos que diseñó Renninger, experto en interferencia de rayos X, pueden haber abierto la puerta a significativos avances en el campo de la detección a través de rayos X.

Finalmente, para terminar, queremos resaltar la plena coherencia de la actitud científica de Renninger, que podemos sintetizar de la siguiente manera. Sobre unos supuestos realistas, según los cuales la teoría describe el mundo real, el científico diseña sus experimentos de modo que sus actuaciones como experimentador constituyen interrogantes sobre cómo es el mundo, cuestiones a las que “responden” las entidades existentes en dicho mundo. Por esta razón, se han de tener en cuenta absolutamente todos los resultados experimentales al construir la imagen del mundo que ofrece la física; esta ciencia no sólo ha de disponer de un formalismo matemático que permita calcular predicciones verificables, sino que también ha de ofrecer una interpretación de dicho formalismo que permita construir una representación inteligible del mundo, que sea lo más intuitiva posible. Y esta interpretación ha de contener la totalidad de los hechos empíricos y si éstos implican unas consecuencias que ponen en duda un determinado marco conceptual éste ha de ser revisado, aunque haya sido previa y ampliamente aceptado.

1256P.Kwiat, H.Weinfurter y A.Zeilinger. Visión cuántica en la oscuridad. *Investigación y ciencia*.1997

BIBLIOGRAFÍA

- ALBERT, D.Z. *Quantum Mechanics and experience*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1992
- ALBERT, D.Z., LOEWER, B. Interpreting the many worlds interpretation. *Synthese* 77, 1988
- BITBOL, M. *Schrödinger's Philosophy of Quantum Mechanics*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996
- BLOKHINTSEV, D.I. *Principles of Quantum Mechanics*. Boston: Allyn and Bacon, 1964
- BOHR, N. The Structure of the Atom. *Nature*. 1923, (p. 1-16)
- ———. Causality and Complementarity. *Philosophical Science*. 1935, vol.4
- ———. Quantum Mechanics and Physical Reality. *Nature*. 1935, vol.136
- ———. Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Physical Review*. 1935, vol.48
- ———. On the notions of causality and complementarity. *Dialectica*. 1948, vol. 2, num.3/4
- ———. *Física atómica y conocimiento humano*. Madrid: Aguilar, 1964
- ———. *Física atòmica i coneixement humà*. Barcelona: Edicions 62, 1967
- ———. *La teoría atómica y la descripción de la Naturaleza*. Madrid: Alianza Editorial, 1988
- ———. *Collected Works*. Amsterdam: Elsevier, 2008
- BOHR, N., KRAMERS, H.A. & SLATER, J.C. The Quantum Theory of Radiation. *Philosophical Magazine*. 1924, vol.47
- BORN, M. *Physics in my Generation*. New York: The English University Press, 1970
- BORN, M. y Hedwig. *Ciencia y conciencia en la era atómica*. Madrid: Alianza Editorial,

1971

- BRILLOUIN, L. Information theory and its applications to fundamental problems in Physics. *Nature*. Feb. 1959
- ———. *Science and Information theory*. New York: Academic Press. 1956-BUB, J. The Daneri-Loinger-Prosperi Quantum Theory of Measurement. *Il Nuovo Cimento*, vol.57, n°2, 1968
- BROCK, S. *Niels Bohr's Philosophy of Quantum Physics*. Berlin: Logos. 2003
- CALDIROLA, P. Teoria della misurazione e teoremi ergodici nella meccanica quantistica. "Science", vol. 58, 1964
- CASSIDY, D. *The life and science of Werner Heisenberg*. New York: W.H. Freeman and Company, 1992
- ———. Heisenberg W.: An Overview of His Life and Work. *100 Years W. Heisenberg's Works and Impact*. (Edit. D. Papenfus et al.) Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2002
- CASSIRER, E. *Las ciencias de la cultura*. México: FCE, 1972
- COHEN-TANNOUJJI, C., DIU, B., LALOË, F. *Quantum Mechanics*. New York: Wiley & Sons, 1977
- CUSHING, J. T. *Quantum Mechanics: Historical Contingency and the Copenhagen Hegemony*. Chicago: University of Chicago Press, 1994
- ———. *Philosophical Concepts in Physics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1998
- DANERI, A., LOINGER, A., PROSPERI, G.M. Quantum theory of measurement and ergodicity conditions. *Nuclear Physics*, 33, 297-319, 1962
- ———. Further remarks on the Relations between statistical mechanics and quantum theory of measurement. *Il Nuovo Cimento*, vol. 44 B, 1, 1966
- DE BAERE, W. Does the quantum formalism allow for the observability of empty quantum

waves? *Foundations of Physics Letters*, vol.10, n°2, 1997

- ———.On the Consequences of Retaining the General Validity of Locality in Physical Theory. *Foundations of Physics*,vol.35,n°1, 2005
- ———.Renninger's Thought Experiment: Implications for Quantum Ontology and for Quantum Mechanics' Interpretation.arXiv:quant-ph/0504031v1 5 Apr 2005
- ———.Reality and Locality in Quantum Mechanics. “Quantum theory”*AIP Conference Proceedings*.Melville, New York, 2007, vol. 962
- DE BROGLIE, L.*Ondas, corpúsculos y mecánica ondulatoria*.Madrid: Espasa Calpe. 1949
- ———.*La physique quantique restera-t-elle indéterministe?*Paris: Gauthier-Villars. 1953
- ———.*Continuidad y discontinuidad en Física moderna*.Madrid: Espasa Calpe. 1957
- ———.*Heisenberg's Uncertainties and the Probabilistic Interpretation of Wave Mechanics*.Dordrecht:Kluwer Academic Publishers.1990
- DEVITT, M. *Relism & Truth*. Oxford: Blackwell.1991
- DEWEERD, A. Interaction-free measurement.*American Association of Physics Teachers*, 70,3, 2002
- DICKE, R.H.Interaction-free quantum measurements: a paradox?*American Association of Physics Teachers*,49(10), 1981
- DIRAC, P. *Principios de Mecánica Cuántica*. Barcelona: Ariel. 1968
- DOWLING, J. To compute or not to compute? *Nature*. Vol. 439. 2006
- EARMAN, J. *A primer on Determinism*. Dordrecht: D.Reidel Publishing Company, 1986
- EINSTEIN, A., PODOLSKY, B. y ROSEN, N. Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Physical Review*. 1935, vol. 47

- EINSTEIN, A. On the Method of Theoretical Physics. *Philosophy of Science* , vol. 1, 1934
- ———. Physics and Reality. *Journal of the Franklin Institute*. 221, 1936
- ———. *Reply to Criticisms. Albert Einstein: philosopher-scientist* (Edit. Paul Schilpp) Evanston, Ill: The Library of Living Philosophers, 1949
- ———. *Autobiographical Notes. Albert Einstein: philosopher-scientist* (Edit. Paul Schilpp) Evanston, Ill: The Library of Living Philosophers, 1949
- ———. *Mi visión del mundo*. Barcelona: Tusquets, 1986
- ———. *Correspondencia con Michele Besso*. Barcelona: Tusquets, 1994
- EINSTEIN, A. y INFELD, Leopold. *L'evolució de la física*. Barcelona: Edicions 62, 1984
- ELIADE, M. *The Encyclopedia of Religion*. New York: Mcmillan, 1987
- ELITZUR, A. C., VAIDMAN, L. Is it possible to know about something without ever interacting with it? *Vistas in Astronomy*, vol. 37, 253-256, 1993
- EPSTEIN, P. S. The Reality Problem in Quantum Mechanics. *American Journal of Physics* 13, 127, 1945
- EVERETT III, H. "Relative State" Formulation of Quantum Mechanics. *Reviews of Modern Physics*, 29,454, 1957
- FAYE, J. *Niels Bohr: His Heritage and Legacy*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1991
- FINE, A. *The Shaky Game. Realism and the Quantum Theory*. Chicago: University of Chicago Press, 1986
- FOLSE, H. J. *The philosophy of Niels Bohr*. Amsterdam: North-Holland Physics Publishing, 1985
- FORMAN, P. *Cultura en Weimar, causalidad y teoría cuántica*. Madrid: Alianza Editorial,

1984

- FRANK, P. *Einstein, Mach and Logical Positivism. Albert Einstein: philosopher-scientist* (Edit. Paul Schilpp) Evanston, Ill: The Library of Living Philosophers, 1949
- GESZTI, T. Interaction-free measurement and forward scattering. *Physical Review A*, vol. 58, n°5, 1998
- GHERAB, K. *De la Interpretación de Copenhague a la Inteligencia Artificial: los físicos y el problema de la consciencia*. Tesis doctoral presentada en 2004 en la Universidad Autónoma de Madrid
- GHERAB, K., SÁNCHEZ, C. Conociendo el efecto Zenón cuántico en experimentos contrafácticos: una aproximación filosófica. *Ontology Studies* 10, 2010
- GONZALO, I. PORRAS, M, LUIS, A. Zeno inhibition of polarization rotation in an optically active medium. *European Journal of Physics*, 36, 2015
- GOTTFRIED, K. Does Quantum Mechanics carry the seeds of its own destruction? *Quantum Reflections*. Cambridge: Cambridge University Press.
- GREEN, H.S. Observation in Quantum Mechanics. *Il Nuovo Cimento*, vol. 9, n°5, 1958
- GRIFFITHS, R. Empty waves: A genuine effect? *Physical Letters A* 178, 1993
- HEISENBERG, W. *The Physical Principles of the Quantum Theory*. New York: Dover Publications, 1930
- ——. Die Rolle der Unbestimmtheitsrelationen in der modernen Physik. *Monatshefte für Mathematik und Physik*, 38, 365-372, 1931
- ——. Kausalgesetz und Quantenmechanik. *Erkenntnis zugleich Annalen der Philosophie* 2, 172-182, 1931
- ——. Indeterminism and Free Will. *Nature*, July 4, 1936
- ——. Atomphysik und Kausalgesetz. *Merkur* 6, 701-711, 1952

- ———. *La imagen de la Naturaleza en la física actual*. Barcelona: Ariel, 1955
- ———. The representation of nature in contemporary physics. *Daedalus* 87(3), 99, 1958
- ———. *Física y filosofía*. Buenos Aires: La isla, 1959
- ———. *Los nuevos fundamentos de la ciencia*. Madrid: Editorial Norte y Sur, 1962
- ———. *La parte y el todo*. Pontevedra: Ediciones Ellago, 1967
- ———. *Quantum Theory and its Interpretation. Bohr Memorial Volume*. Amsterdam: North-Holland Publishing Co. 1967
- ———. *Más allá de la física*. Madrid: Biblioteca de autores cristianos, 1974
- ———. *Encuentros y conversaciones con Einstein y otros ensayos*. Madrid: Alianza Editorial, 1980
- ———. *Gesammelte Werke*. Berlin: Springer, 1984
- HEITLER, W. *The Departure from Classical Thought in Modern Physics. Albert Einstein: philosopher-scientist* (Edit. Paul Schilpp) Evanston, Ill: The Library of Living Philosophers, 1949
- HØFFDING, H. *The Problems of Philosophy*. New York: MacMillan, 1905
- ———. *Historia de la filosofía moderna*. Madrid: Editor D.Jorro, 1907
- HOLTON, G. *Concepts and theories in physical science*. Princeton: Princeton University Press. 1952
- ———. *Ensayos sobre el pensamiento científico en la época de Einstein*. Madrid: Alianza Editorial, 1982
- HOSEMANN, R., BAGCHI, S.N. Begründung einer Algebra physikalisch beobachtbarer Funktionen mittels Faltungsoperationen. *Zeitschrift für Physik*, Bd. 135, 50-84, 1953

- HOSTEN, O., RAKHER, M., BARREIRO, J., PETERS, N., KWIAT, P. Counterfactual quantum computation through quantum interrogation. *Nature*. 2006, vol.439
- HUGUES, R. I. G. *The Structure and Interpretation of Quantum Mechanics*. Cambridge: Harvard University Press, 1992
- HUME, D. *Abstract of Treatise of Human Nature*. Cambridge: Cambridge University Press, 1938
- JANOSSY, L. Die physikalische Problematik des Teilchen-Wellen-Problems der Quantenmechanik. *Annalen der Physik*. 6. Band 11, 1953
- GRANGIER, P., LEVENSON, J. POIZAT, J-P. Quantum non-demolition measurements in optics. *Nature*, vol. 396, 1998
- JAMMER, M. *Indeterminacy in Physics. Dictionary of the History of Ideas*. New York: Charles Scribner's Sons, vol. 2, 1973
- ———. *The Philosophy of Quantum Mechanics*. New York: John Wiley & Sons, 1974
- ———. *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*. New York: Tomash Publishers, 1989
- JAMES, W. *Principios de Psicología*. México D.F.: Fondo de cultura económica, 1989
- JORDAN, P. *Anschauliche Quantentheorie*. Berlin: Verlag von J. Springer. 1936
- KANT, I. *Crítica de la razón pura*. México: Fondo de cultura económica, 2009
- KILMISTER, C.W. *Schrödinger. Centenary celebration of a polymath*. Cambridge: Cambridge University Press. 1987
- KWIAT, P., WEINFURTER, H., HERZOG, T., ZEILINGER, A. Interaction-Free Measurement. *Physical Review Letters*. Vol. 74, nº 24, 1995
- KWIAT, P., WEINFURTER, H., ZEILINGER, A. Visión cuántica en la oscuridad. *Investigación y ciencia*. Enero de 1997

- KWIAT, P., WHITE, A.G., MITCHELL, J.R., NAIRZ, O., WEIHS,G.,WEINFURTER,H.,ZEILINGER,A. High-efficiency quantum interrogation measurements via the quantum Zeno effect. *ArXiv:quant-ph/9909083v1* 27 Sep 1999
- LONDON,F., BAUER, E. The theory of observation in Quantum Mechanics. *Quantum Theory and Measurement*. Princeton: Princeton University Press.1983
- LENZEN, V.. *Einstein's Theory of Knowledge. Albert Einstein:philosopher-scientist* (Edit. Paul Schilpp)Evanston, Ill:The Library of Living Philosophers, 1949
- LINDEMANN, F. *El significado físico de la teoría cuántica*. Oxford: Clarendon Press, 1932
- LUCRECIO. *De rerum natura*. Madrid: Alianza Editorial, 2013
- MACH, E.. *Conocimiento y error*.Buenos Aires: Espasa-Calpe, 1948
- ——. *Análisis de las sensaciones*.Barcelona: Altafulla, 1987
- MARGENAU, H.. *Einstein's Conception of Reality*.*Albert Einstein:philosopher-scientist* (Edit. Paul Schilpp)Evanston, Ill:The Library of Living Philosophers, 1949
- ——. *La Naturaleza de la realidad física*. Madrid: Tecnos, 1970
- MARGENAU, H., LINDSAY, R.. *Foundations of Physics*.Woodbridge: Ox Bow Press, 1981
- MESSIAH, A. *Mecánica Cuántica*.Madrid: Editorial Tecnos, 1983
- MITCHISON, G., JOZSA, R. The limits of counterfactual computation. *ArXiv:quant-ph/0606092v3* 3 Jan 2007
- MOORE, W. *Schrödinger, life and thought*.Cambridge: Cambridge University Press, 1989
- MØLLER, P. M. *En Dansk Students Eventyr*.Kopenhagen:Gyldendal, 1825
- MÜLLER, M.*Introducción a la filosofía vedanta*.Barcelona:mra, 1997
- MURDOCH, D. *Niels Bohr's philosophy of physics*.Cambridge: Cambridge University

Press,1987

- PAIS, A. *El Señor es sutil...La ciencia y la vida de Albert Einstein*. Barcelona: Ariel, 1984
- ———. *Niels Bohr's Times, in Physics, Philosophy and Polity*. Oxford: Clarendon Press, 1991
- PENROSE, R. *Shadows of the Mind*. London: Vintage, 1995
- PETERSEN, A. The philosophy of Niels Bohr. *Bulletin of the Atomic Scientists*. 1963, vol.19
- ———. Niels Bohr and the philosophy of science. *La philosophie contemporaine*. Firenze:Klibansky, vol 2, 1968
- PLANCK, M. *El coneixement del món físic*. Barcelona: Edicions 62, 1984
- PLATÓN. *Obras completas*. Madrid: Aguilar, 1974
- POPPER, K. *La lògica de la investigació científica*. Barcelona: Editorial Laia, 1985
- ———. *Teoría cuántica y el cisma en Física*. Madrid: Tecnos, 2011
- PROSPERI, G.M. y SCOTTI, A. Ergodic Theorem in Quantum Mechanics. *Il Nuovo Cimento*. Vol. 13, nº5, 1959
- ROSENTHAL-SCHNEIDER, *Presuppositions and Anticipations. Albert Einstein: philosopher-scientist* (Edit. Paul Schilpp) Evanston, Ill: The Library of Living Philosophers, 1949
- PLANCK, M. *The Universe in the Light of Modern Physics*. London: G. Allen and Unwin, 1931
- ———. *El coneixement del món físic*. Barcelona: Edicions 62, 1984
- PETRUCCIOLI, S. *Atoms, metaphors and paradoxes*. Cambridge: Cambridge University Press. 1993

- PUTNAM, H. *A philosopher looks at Quantum Mechanics. Philosophical Papers*. Vol. 1. Cambridge: Cambridge University Press, 1965
- ——. *Realism with a Human Face*. Cambridge U.S.A.: Harvard University Press, 1990
- RENNINGER, M. Zum Wellen-Korpuskel-Dualismus. *Zeitschrift für Physik* **136**, 251-261, 1953, traducido por W.De Baere como “On Wave-Particle Duality” en “Quantum theory”. *AIP Conference Proceedings*. Melville, New York, vol. 962, p.3, 2007
- ——. Messungen ohne Störung des Messobjekts. *Zeitschrift für Physik*, **158**, 417-421, 1960, traducido por W.De Baere como “Interaction-Free Measurement” en “Quantum theory”. *AIP Conference Proceedings*. Melville, New York, vol. 962, p.9, 2007
- ROSENFELD, L. The measuring process in Quantum Mechanics. *Selected Papers of Léon Rosenfeld*. London:Reidel Publishing Company. 1979
- ROZENTAL, S. (Compilador). *Niels Bohr. His life and work as seen by his friends and colleagues*. Amsterdam: North Holland Physics Publishing, 1967
- RUSSELL, B. *The Analysis of Mind*. London: G.Allen & Unwin, 1921
- ——. *El coneixement humà*. Barcelona: Edicions 62, 1985
- SÁNCHEZ RON, J. M. *Historia de la física cuántica. El período fundacional (1860-1926)*. Barcelona: Crítica, 2001
- SCHADER, D. L. R. S. and the Story of Memory. Philadelphia: Psychology Press, 2001
- SCHRÖDINGER, E. An undulatory theory of the mechanics of atoms and molecules. *Physical Review*, vol.28, n°26, 1926
- ——. *Science and the Human Temperament*. London: G.Allen & Unwin Ltd, 1935
- ——. The present situation in Quantum Mechanics. *Proceedings of the American Philosophical Society*, 124, 1935
- ——. Indeterminism and Free Will. *Nature*, July 4, 1936

- ———. La ley estadística de la Naturaleza. *Nature*. 1944, vol.153
- ———.Are there Quantum Jumps. *The British Journal for the Philosophy of Science*,1952, vol. 3,nº10
- ———.The philosophy of experiment. *Il Nuovo Cimento*.1, 5-15, 1955
- ———.Can perhaps Energy be a merely Statistical Concept? *Il Nuovo Cimento*, vol. IX, nº1, 1958
- ———.*La Naturaleza y los griegos*.Madrid: Aguilar, 1961
- ———.Statistical Thermodynamics. Cambridge: Cambridge University Press, 1964
- ———.*Què és la vida? La ment i la matèria*.Barcelona: Edicions 62, 1967
- ———.*Letters on Wave Mechanics*.(Edit.Przibram) New York: Philosophical Library, 1967
- ———.Irreversibility. Band 1. *Gesammelte Abhandlungen*, 1968
- ———.¿*Qué es una ley de la Naturaleza?*México: Fondo de Cultura Económica, 1975
- ———.*Collected Papers on Wave Mechanics*. New York: Chelsea Publishing Company, 1982
- ———.*Gesammelte Abhandlungen*. Wien: Österreichische Akademie der Wissenschaften, 1984
- ———.*The meaning of wave mechanics. Band 3.Gesammelte Abhandlungen*, 1984
- ———.*Mi concepción del mundo*.Barcelona: Tusquets, 1985
- ———.La estructura del espacio-tiempo. Madrid: Alianza Edit., 1992
- ———.*The Interpretation of Quantum Mechanics*.Woodbridge:Ox Bow Press, 1996
- ———.*La nueva mecánica ondulatoria. Heisenberg, Bohr, Schrödinger. Física cuántica*. Barcelona: Biblioteca Universal del Círculo de Lectores, 1996

- ———. *La nueva mecánica ondulatoria y otros escritos* (Ed. Arana, Juan). Madrid: Biblioteca Nueva, 2001
- ———. *Ciencia y humanismo*. Barcelona: Tusquets, 2009
- SCHOPENHAUER, A. *El mundo como voluntad y representación*. México: Porrúa, 1992
- SELLERI, F. *El debate de la teoría cuántica*. Madrid: Alianza, 1986
- SCOTT, W. T. *Erwin Schrödinger. An Introduction to His Writings*. Massachusetts: University of Massachusetts Press, 1967
- SOSA, E. *Causation and conditionals*. London: Oxford University Press. 1975
- SPINOZA, B. *Ética*. Madrid: Editora nacional, 1975
- TOLA, F. y DRAGONETTI. *Filosofía de la India*. Barcelona: Kairós, 2008
- UPANISHADS. Editores: Mascaró, J y Abeleira, J.M. Barcelona: Debolsillo, 2011
- VAIDMAN, L. On Schizophrenic Experiences of the Neutron or Why we should believe in Many-Worlds Interpretation of Quantum Theory. ArXiv:quant-ph/9609006v1 7 Sep 1996
- ———. Are Interaction-free measurements interaction free? arXiv:quant-ph/0006077v1 16 Jun 2000
- ———. The paradoxes of the Interaction-free measurements. arXiv:quant-ph/0102049v1 9 Feb 2001
- ———. Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics. *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <<http://plato.stanford.edu/archives/sum2002/entries/qm-manyworlds/>>
- ———. The Meaning of the Interaction-Free Measurements. *Foundations of Physics*, vol.33,nº3,2003
- VAN DER WAERDEN, B. L. (Editor). *Sources of Quantum Mechanics*. New York: Dover Publications, 1967

- VON NEUMANN, J. *Fundamentos matemáticos de la mecánica cuántica*. Madrid: CSIC, 1991
- VON WEIZSÄCKER, C. *La imagen física del mundo*. Madrid: Biblioteca de autores cristianos, 1974
- WHEELER, J. A. y ZUREK, W. H. (Editores). *Quantum Theory and Measurement*. Princeton: Princeton University Press, 1983
- WHITE, A., MITCHELL, J., NAIRZ, O., KWIAT, P. “Interaction-free Imaging. ArXiv:quant-ph/9803060v2 26 Apr 1998
- WIGNER, E. P. The Problem of Measurement. *American Journal of Physics*, 31, 6-5 , 1963
- ———. Remarks on the Mind-Body Question (1961) en WHEELER, J.A. Y ZUREK, W.H. *Quantum Theory and Measurement*. Princeton: Princeton University Press, 1983
- WIGNER, E.P., JAUCH, J.M., YANASE, M.M. Some Comments Concerning Measurements in Quantum Mechanics. *Il Nuovo Cimento*. Vol.48,B, 1967
- WITTGENSTEIN, L.. *Tractatus logico-philosophicus*. Barcelona: Laia, 1981
- <<http://plato.stanford.edu/archives/spr2013/entries/berkeley/>>
- <<http://plato.stanford.edu/archives/sum2010/entries/scientific-explanation/>>
- <<http://plato.stanford.edu/entries/scientific-realism/>>
- <<http://plato.stanford.edu/archives/spr2014/entries/qt-uncertainty/>>
- <<http://plato.stanford.edu/archives/fall2014/entries/qm-copenhagen/>>