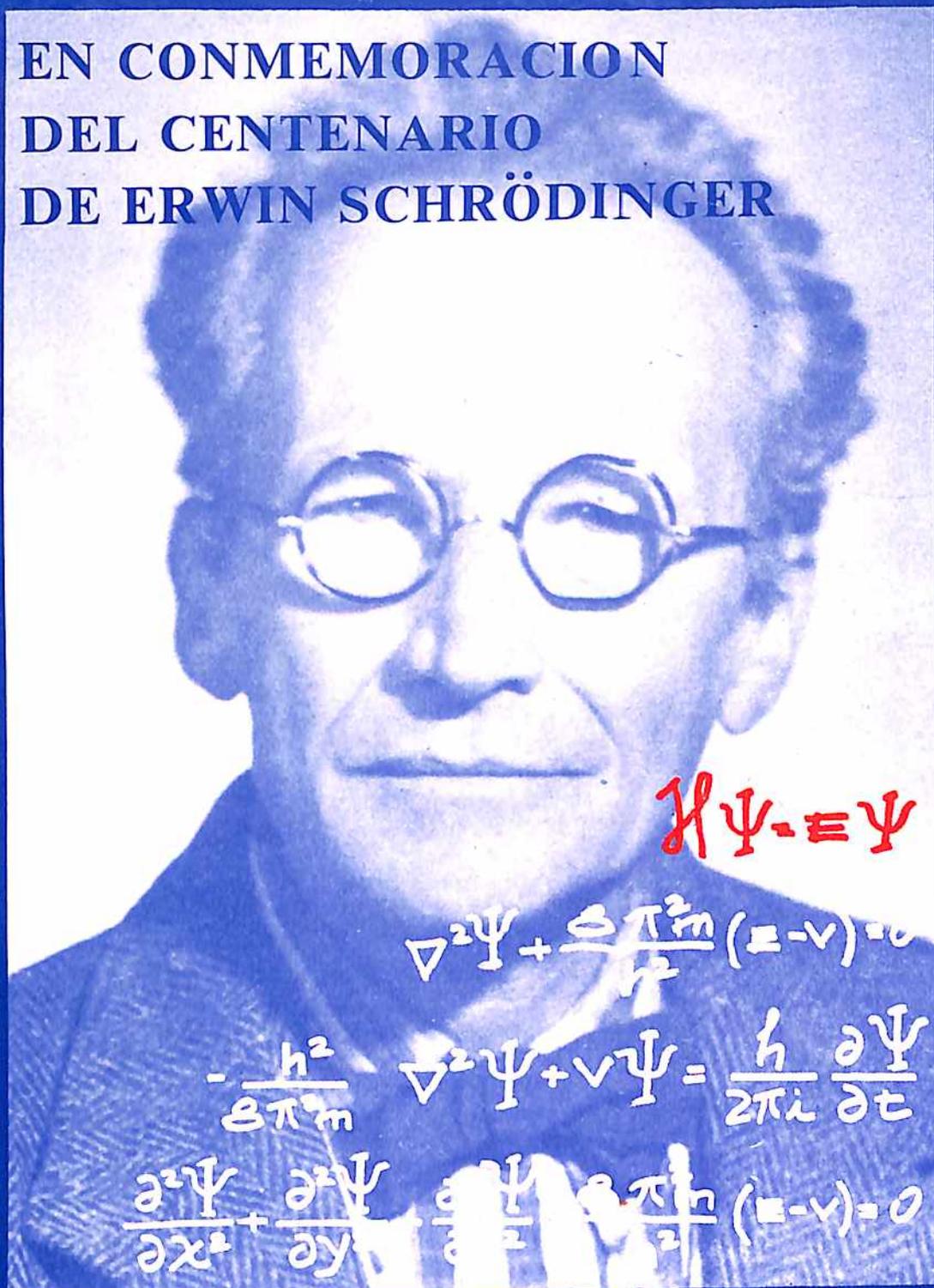


# MEMORIAS DEL SEMINARIO

## EN CONMEMORACION DEL CENTENARIO DE ERWIN SCHRÖDINGER



ACADEMIA COLOMBIANA DE CIENCIAS EXACTAS,  
FISICAS Y NATURALES

COLECCION ENRIQUE PEREZ-ARBELAEZ

No. 1

**ACADEMIA COLOMBIANA DE CIENCIAS EXACTAS, FISICAS Y NATURALES**

**COLECCION ENRIQUE PEREZ-ARBELAEZ**

**No. 1**

**MEMORIAS  
DEL SEMINARIO  
EN CONMEMORACION  
DEL CENTENARIO  
DE ERWIN SCHRÖDINGER**

**BOGOTA, D.E., Octubre de 1987**

MEMORIAS  
DE  
LA  
ACADEMIA  
COLOMBIANA  
DE CIENCIAS  
EXACTAS,  
FISICAS Y  
NATURALES

© ACADEMIA COLOMBIANA DE CIENCIAS EXACTAS, FISICAS Y NATURALES  
Carrera 3a. A No. 17-34 – Apartado Aéreo 44763 – Bogotá, D. E., COLOMBIA

Todos los derechos reservados. Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida o transmitida, en ninguna forma y por ningún medio –gráfico, electrónico o mecánico, incluyendo fotocopias, sistemas de registro, grabación, información, almacenamiento y difusión– sin autorización escrita. Bogotá, D.E. Edición 1988.

Diseño y Diagramación:  
Pedro J. Urbano Huertas

Textos y Artes:  
Renglones - Asesorías Editoriales

Impresión:  
Editorial Presencia  
Bogotá, - Colombia 1988

## PROLOGO

Con la publicación de esta obra que reúne las "Memorias del Seminario en conmemoración del centenario del nacimiento de ERWIN SCHRODINGER", organizado por la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, el Grupo de Física Teórica y el Departamento de Física de la Universidad Nacional de Colombia, se inicia una nueva COLECCION de publicaciones de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales que lleva por nombre el del insigne botánico colombiano, miembro fundador de la Academia, Enrique Pérez-Arbeláez.

La nueva COLECCION está destinada a la publicación de obras que se refieran al desarrollo histórico de las Ciencias, tanto en el contexto universal como nacional. En ella tendrán cabida contribuciones preparadas por los Miembros de la Academia, o por investigadores que hayan profundizado sobre este tema.

Se preferirá, desde luego, aquellas obras que por su alto nivel científico y analítico cumplan con el objetivo de motivar a la juventud colombiana y a la comunidad científica en general por el estudio y la profundización de las ciencias y el percatarse de la difícil peripecia intelectual que implica el descubrimiento de una nueva hipótesis o de una nueva teoría científica.

El nombre de ENRIQUE PEREZ-ARBELAEZ, con el cual la Academia ha decidido denominar esta nueva colección, de suyo se justifica, si se analiza, evalúa y justiprecia la obra de Enrique Pérez-Arbeláez; en particular, como fundador y propulsor, en nuestro medio, de Instituciones que a la postre, se han convertido en activos centros de creación científica. Para el caso baste mencionar el Herbario Nacional Colombiano, fundado por Pérez-Arbeláez, al finalizar la década de los años veinte, o el Instituto Botánico, hoy Instituto de Ciencias Naturales - Museo de Historia Natural y el Jardín Botánico, "José Celestino Mutis" establecidos en 1936 y 1955, respectivamente.

Enrique Pérez-Arbeláez descolló también por sus esfuerzos y logros en la reconstrucción del patrimonio histórico de las Ciencias Botánicas en Colombia. Dedicó los mejores años de su actividad intelectual a rescatar, estudiar y difundir, en particular, la obra de Don José Celestino Mutis y de la Real Expedición Botánica al Nuevo Reino de Granada,

como escuela del pensamiento científico y semillero de científicos neogranadinos, cuya influencia habría de prolongarse hasta el presente siglo. Siempre estuvo convencido de que el desarrollo cultural de los pueblos hacia el futuro necesariamente debe cimentarse y proyectarse sobre la evaluación crítica de experiencias del pasado.

Conciente como el que más, del gran potencial de los Recursos Naturales de Colombia, hasta en los últimos días de su vida, asumió la tarea de concientizar a los colombianos sobre la responsabilidad que implica su manejo y la necesidad de utilizar sistemas de aprovechamiento que no implicaran su destrucción irreversible. Con gran tezhón, y perseverancia ejemplar, compuso su obra, en varios volúmenes, sobre los Recursos Naturales de Colombia, en donde con agudeza y perspicacia describe los resultados de las observaciones realizadas en sus viajes a lo largo y ancho del territorio de Colombia; tarea que supo complementar admirablemente a través de su columna en el periódico EL TIEMPO de Bogotá. Las gentes de Colombia admiran particularmente su libro PLANTAS UTILES DE COLOMBIA, aparecida ya en varias ediciones y de amplia consulta no solamente en Colombia y otros países de América Latina, sino aun en países remotos.

Formó parte del grupo de ilustres colombianos que impulsaron la fundación de la Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, y contribuyó notablemente a su consolidación y dinamismo durante las primeras décadas de existencia de la Institución, como se desprende de sus numerosas contribuciones aparecidas en las páginas de la Revista de la Academia.

Justo es entonces, que esta COLECCION lleve su nombre y que de esta manera la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales rinda testimonio de aprecio por la personalidad y la obra de este colombiano ilustre.

Luis Eduardo Mora-Osejo

BOGOTA, OCTUBRE DE 1987

## COLABORADORES

### GERMAN ARENAS S.

Profesor Departamento de Física  
Facultad de Ciencias Universidad  
Nacional de Colombia, Bogotá,  
D.E., - Colombia.

### EFRAIN BARBOSA R.

Profesor Departamento de Física  
Facultad de Ciencias Universidad  
Nacional de Colombia, Bogotá,  
D.E. - Colombia.

### EDUARDO BRIEVA B.

Miembro de Número Academia  
Colombiana de Ciencias Exactas,  
Físicas y Naturales. Profesor Facultad  
de Ciencias, Observatorio Astro-  
nómico Universidad Nacional de  
Colombia, Bogotá, D.E.- Colombia.

### PAUL BROMBERG Z.

Profesor Departamento de Física  
Universidad Nacional de Colombia,  
Bogotá, D.E. - Colombia.

### GUILLERMO CASTILO T.

Miembro de Número Academia de  
Ciencias Exactas, Físicas y Natura-  
les. Profesor Departamento de Físi-  
ca, Facultad de Ciencias Universi-  
dad Nacional de Colombia, Bogotá,  
D.E. - Colombia.

### DIOGENES CAMPOS R.

Profesor Grupo de Física Teórica  
Departamento de Física, Facultad  
de Ciencias Universidad Nacional  
de Colombia, Bogotá, D.E. - Colom-  
bia.

### RAMON FAYAD G.

Profesor Departamento de Física,  
Facultad de Ciencias Universidad  
Nacional de Colombia, Bogotá,  
D.E. - Colombia.

### BERNARDO GOMEZ M.

Departamento de Física, Universi-  
dad de Los Andes. Bogotá, D.E. -  
Colombia.

### ALICIA GUERRERO DE MESA

Profesora Grupo de Física Teórica  
Departamento de Física, Facultad  
de Ciencias, Universidad Nacional  
de Colombia, Bogotá, D.E. - Colom-  
bia.

### VIRGILIO NIÑO C.

Profesor Grupo de Física Teórica  
Departamento de Física, Facultad  
de Ciencias Universidad Nacional de  
Colombia, Bogotá, D.E. - Colombia.

### JAIRO ROLDAN CH.

Profesor Departamento de Física  
Facultad de Ciencias, Universidad  
del Valle, Cali - Colombia.

### CARLOS URIBE G.

Profesor Departamento de Física  
Facultad de Ciencias, Universidad  
del Valle, Cali - Colombia.

### JOSE LUIS VILLAVECES C.

Miembro Correspondiente de la  
Academia Colombiana de Ciencias  
Exactas, Físicas y Naturales, Grupo  
de Química Teórica Departamento  
de Química Universidad Nacional  
de Colombia, Bogotá, D.E. Colom-  
bia.

## CONTENIDO

	Pág.
PRESENTACION .....	2
1. ERWIN SCHRÖDINGER y Algunos Aspectos de la Física de su Tiempo. Eduardo Brieva B.....	8
2. La Ecuación de SCHRÖDINGER y el Nacimiento de la Mecánica Cuántica. Guillermo Castillo T. ....	24
3. Visión de la Naturaleza a través de la Mecánica Cuántica- Impacto sobre la Física. Bernardo Gómez M .....	34
4. El Influjo de la Obra de ERWIN SCHRÖDINGER sobre la Química del Siglo XX. José Luis Villaveces C. ....	54
5. SCHRÖDINGER y la biología: El Drama de la Interdisciplinariedad. Paul Bromberg Z. ....	68
6. "¿Que es la Vida?" y la Autoridad de la Palabra Escrita. Ramón Fayad G. ....	90
7. Interpretación de la Mecánica Cuántica. Virgilio Niño C. ....	110
8. Causalidad y Sentido del Tiempo. Alicia Guerrero de Mesa... ..	124
9. Consecuencias Técnicas de la Mecánica Cuántica. Germán Arenas .....	135
10. El Atomo de Hidrógeno desde SCHRÖDINGER hasta el Presente. Efrain Barbosa R. ....	146
11. Física Teórica y Método Científico. Diógenes Campos R. ....	158
12. Algunas Corrientes de Interpretación Epistemológica de la Mecánica Cuántica. Carlos Uribe G. ....	180
13. La Realidad de la Física para Bohr. Jairo Roldán Ch. ....	198

TEORIA CUANTICA  
ALGUNAS CONSECUENCIAS FILOSOFICAS,  
CIENTIFICAS Y TECNOLOGICAS

CICLO DE CONFERENCIAS EN  
EL CENTENARIO DE

ERWIN SCHRÖDINGER  
1887 – 1963

PRESENTACION

COMITE ORGANIZADOR. *Dr. Diógenes Campos R., Dr. Mauricio García C., Dr. Jairo Giraldo G., Dr. Virgilio Niño C., Dr. José Luis Villaveces C.*

BOGOTA, OCTUBRE DE 1987

---

COMITE ORGANIZADOR

ERWIN SCHRÖDINGER nació en Viena el 12 de agosto de 1887, En 1933 recibió el Premio Nobel de Física “por el descubrimiento de principios fecundos para el desarrollo de la teoría atómica”. Durante el medio siglo transcurrido entre estas dos fechas cambió Europa de faz y nació la Física Moderna, alumbrada por los trabajos de Einstein, Heisenberg, Pauli, Dirac y, de manera definitiva, del propio SCHRÖDINGER. Todos ellos estuvieron dedicados a la investigación básica, siendo su interés primordial el lograr el entendimiento de la naturaleza del mundo físico, luego de que la crisis de la Física Clásica demostrara que el tradicional mundo mecánico de Newton no constituía explicación satisfactoria.

SCHRÖDINGER fue creador de la Mecánica Ondulatoria y en esa forma, se hizo cofundador de la teoría física que se conoce hoy en día con el nombre de mecánica cuántica, desarrollada básicamente entre 1900 y 1930. Esta teoría, junto con la relatividad especial y la relatividad general, constituyen los principales pilares sobre los cuales se construyó la revolución científica y tecnológica del Siglo XX. La teoría cuántica es un triunfo intelectual del hombre y un ejemplo sobresaliente del proceso científico creativo.

La ecuación de SCHRÖDINGER es una de las ecuaciones de mayor trascendencia en la física de nuestro tiempo. Gracias a ella, se avanzó radicalmente en la tarea de explicar la estructura atómica y molecular,

revolucionando la química, dando origen a ciertas técnicas espectroscópicas y explicando diversidad de fenómenos físicos de interés básico o de utilidad práctica. La mecánica cuántica ha permitido empezar a entender a partir de primeros principios las propiedades macroscópicas de la materia, justificando así la íntima relación que existe entre propiedades macroscópicas y estructura y dinámica molecular. La electrónica moderna, el laser, la microscopía electrónica, la superconductividad, la física nuclear, tienen su fundamento y punto de apoyo en la mecánica cuántica.

Toda la vida está basada en moléculas gigantes —macromoléculas—, cuya estructura y estabilidad se puede explicar en principio con la teoría cuántica. Con esta idea en mente ha surgido en las últimas décadas la denominada Biología Molecular.

La vieja concepción mecánica del mundo describía los fenómenos naturales como la evolución en el espacio tiempo de partículas, regida conforme a relaciones de causa a efecto, con un comportamiento completamente determinista. Con la mecánica cuántica se introducen notables modificaciones en nuestro entendimiento de la realidad física. Como dice Einstein: "las magnitudes que figuran en las leyes de la teoría cuántica no pretenden describir la misma realidad física, sino tan sólo las probabilidades de que se produzca una determinada realidad". Este hecho trae profundas implicaciones que han contribuido a revolucionar la filosofía en nuestro tiempo, dando origen a controversias y polémicas aún no concluidas.

La investigación básica de comienzos de siglo se ha desarrollado a lo largo de él, dando origen a tremendos cambios tecnológicos que han transformado la vida humana en las últimas décadas. En especial, el desarrollo de la física del estado sólido ha llevado al entendimiento y dominio de las propiedades eléctricas en los metales y semiconductores, con múltiples aplicaciones prácticas.

Para conmemorar el centenario de ERWIN SCHRÖDINGER convocaron el Grupo de Física Teórica de la Universidad Nacional de Colombia, la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales y el Departamento de Física de la misma Universidad, a un selecto grupo de profesores universitarios para dictar un ciclo de conferencias destacando aspectos históricos, científicos, técnicos y filosóficos de la obra del vienés. Cabría preguntarse ¿por qué tanto interés en celebrar en un

frío altiplano de los Andes el centenario de un científico austriaco? Creemos importante mencionarlo, porque el ciclo de conferencias mostró con creces que, más allá de las diferencias nacionales, tanto él como nosotros formamos parte de ese continuo cultural que hunde sus raíces en la Atenas Clásica y en la Grecia Jónica y que a falta de mejor nombre, denominamos Civilización Occidental. SCHRÖDINGER sostuvo que los filósofos griegos no eran héroes del pasado sino seres actuales cuyo pensamiento continuará vivo y vigente en la Europa contemporánea. No en balde, él mismo fue tildado por sus contemporáneos de 'personificación de un sabio griego'. Este sabio vive entre nosotros hoy y es parte de nuestra propia cultura. No era un simple homenaje cortés a un personaje lejano el que hicieron los distintos participantes en este volumen, cuando, invitados a dictar una conferencia, respondieron inmediatamente, sin dudar, y no tuvieron que hundirse en volúmenes a la caza de datos para armar escolásticas conferencias, sino que vinieron a exponernos parte de la forma en que su propio trabajo se relaciona con el de SCHRÖDINGER. Por ello ninguna de las conferencias cuyos textos conforman este volumen es un panegírico. Ninguno se limitó a cantar loas al sabio lejano. Todas son expresión de un conflicto actual, vivo, en proceso, en el cual SCHRÖDINGER está presente en el trabajo del autor.

Porque SCHRÖDINGER no es un lejano desconocido, al realizarse el ciclo de conferencias en la Universidad Nacional de Colombia, en Bogotá, se reunió por cinco noches un auditorio del orden de trescientas personas, a escuchar atentamente y después a intervenir activamente, polémicamente, creativamente, críticamente. Por la actualidad de su pensamiento entre nosotros, la Universidad de Los Andes en la misma ciudad resolvió repetir el Ciclo de Conferencias con un éxito similar, guardadas las proporciones de los dos centros académicos. No puede darse en la efeméride formal de un centenario desconocido un incidente como el que ocurrió durante el segundo ciclo de conferencias cuando, después de cerca de dos horas de exposición, ocurrió un apagón y, en la más completa oscuridad, el público continuó lanzando sus preguntas y manteniendo el debate durante más de un cuarto de hora hasta que volvió la luz y el siguiente conferencista asumió su turno.

ERWIN SCHRÖDINGER nació en Viena en 1887 y, a través de su obra sentó las bases del más avanzado e interesante de nuestra propia visión contemporánea del mundo. Por ello celebramos el Ciclo de Conferencias y editamos hoy este volumen en su honor.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos muy especialmente a las entidades que organizaron e hicieron posible este evento:

- ACADEMIA COLOMBIANA DE CIENCIAS EXACTAS, FISICAS Y NATURALES.
- GRUPO DE FISICA TEORICA.
- DEPARTAMENTO DE FISICA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA.

Queremos mencionar particularmente a la Embajada de Austria en Colombia, que nos facilitó gentilmente materiales bibliográficos y, de manera muy importante, agradecer también al numeroso público que, en la Universidad Nacional de Colombia y en la Universidad de Los Andes confirmó con su activa participación la importancia de este evento.

TEORIA CUANTICA  
ALGUNAS CONSECUENCIAS FILOSOFICAS,  
CIENTIFICAS Y TECNOLOGICAS

CICLO DE CONFERENCIAS EN  
EL CENTENARIO DE

ERWIN SCHRÖDINGER  
1887 - 1963

1

*EDUARDO BRIEVA B. Miembro de Número Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Física y Naturales.  
Profesor Facultad de Ciencias, Observatorio Astronómico.  
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.E. - Colombia.*

# ERWIN SCHRÖDINGER Y ALGUNOS ASPECTOS DE LA FISICA DE SU TIEMPO

1

*EDUARDO BRIEVA B.*

El profesor ERWIN SCHRÖDINGER murió el 4 de enero de 1961 en su ciudad natal, Viena, y fue enterrado en las montañas del Tirol. Había vuelto cinco años antes, como profesor honorario, al Instituto de Física de la Universidad de Viena, lugar de sus primeras actividades científicas. Desaparecía así uno de los creadores de la Mecánica Cuántica, disciplina surgida de la rápida sucesión de eventos ocurridos en la primera mitad del presente siglo, que revolucionaron la Física Teórica. Su gran descubrimiento, la ecuación de onda que lleva su nombre, representó un importante avance del conocimiento científico.<sup>1</sup>

En toda la historia de la Física no ha habido quizá un período de transición tan inesperado, abrupto y amplio como el que se inició a fines del siglo pasado. Las teorías físicas se habían desarrollado desde los tiempos de Galileo y Newton en forma progresiva, acrecentando sin cesar la comprensión de los fenómenos de la naturaleza. Nuevos conceptos, adicionales a los de Newton, habían sido introducidos; frescos y poderosos métodos se habían incorporado al arsenal matemático. Como resultado construyéronse flamantes teorías que, como el Electromagnetismo y la Termodinámica, completaban la Mecánica newtoniana. Así que cuando el joven Max Carl Ernst Ludwig Planck se presentó, en

1874, a la Universidad de Munich con el objeto de informarse sobre las perspectivas de la profesión de físico, el encargado, Philipp von Jolly<sup>2</sup>, quiso disuadirlo con obstinación. Como otros Jolly pensaba que en Física lo esencial estaba hecho y que faltaban sólo algunos detalles para completar el cuadro.

En 1887 Hertz lograba producir y transmitir ondas desde un circuito eléctrico primario a otro secundario, en un experimento cuyo objetivo era la verificación de la teoría de Maxwell, que predecía la existencia de ondas electromagnéticas. Culminaba así una vieja historia sobre la naturaleza de la luz que se remonta hasta los griegos, quienes fueron los primeros en formular hipótesis al respecto, basándose en que debía existir algo que actúa entre el objeto y el ojo que lo percibe. Así nacieron y se desarrollaron dos teorías para explicar de qué manera la luz atraviesa el espacio que separa el emisor del receptor. La primera de ellas, corpuscular, consideraba que la luz estaba compuesta por una infinidad de corpúsculos proyectados a gran velocidad en todas direcciones por el cuerpo luminoso; Newton la prefirió, al observar que la luz se propaga en línea recta, y logró explicar, con base en ella, prácticamente todos los fenómenos luminosos. La segunda, ondulatoria, afirmaba que la luz era la manifestación de ondas que se propagaban en un medio material omnipresente, el éter lumínico cuya única razón de ser era servir de soporte a la teoría; sus partidarios, encabezados por el holandés Christian Huygens, argumentaban sin éxito que dos rayos de luz pueden cruzarse sin sufrir alteración, hecho inexplicable para la teoría corpuscular. Después de la muerte de Newton se hicieron nuevos descubrimientos experimentales sobre la luz y se desarrollaron las matemáticas apropiadas para el estudio del movimiento vibratorio. Mientras que el inglés Robert Young demostraba la existencia del fenómeno de interferencia, el francés Fresnel perfeccionaba en alto grado la teoría ondulatoria. Finalmente Leon Foucault, más conocido por el péndulo que lleva su nombre, midió, en 1850 y 1862, la velocidad de propagación de la luz en el agua y la encontró inferior a su velocidad en el vacío, confirmando así las predicciones de los herederos de Huygens.

Por otra parte, la teoría electromagnética, síntesis magnífica lograda por el escocés James C. Maxwell a partir de las ideas de Coulomb, Galvani, Ampère, Faraday y otros, introdujo la noción fundamental de campo, entidad responsable de los fenómenos eléctricos y magnéticos, para los cuales se postuló un medio que les sirviera de soporte, al llama-

do éter electromagnético. En 1871 tuvo Maxwell la brillante idea de suponer que las propiedades de la luz se explicaban admitiendo que se trataba de un fenómeno electromagnético de tipo ondulatorio. Al atribuir la misma naturaleza a las vibraciones luminosas y a las eléctricas identificaba los dos éteres, cuya distinción era un obstáculo incómodo. Los experimentos de Hertz en Karlsruhe constituyeron, pues, un admirable triunfo de la Física experimental y demostraron, al mismo tiempo, la corrección de la teoría de Maxwell.

Ese mismo año de 1887, en julio, Michelson y Morley colocaron su interferómetro en posición y buscaron el desplazamiento esperado en las franjas de interferencia, que aparecería como consecuencia del movimiento de la Tierra con respecto al éter<sup>3</sup>. El 17 de agosto Michelson escribió a Lord Rayleigh informándole el resultado negativo del experimento<sup>4</sup>. Cinco días antes, el 12, nacía en Viena ERWIN SCHRÖDINGER.

Como es sabido, el desenlace inesperado del experimento de Michelson y Morley puso en duda la noción de éter, privando a las ondas electromagnéticas de su medio de propagación. La dificultad fue resuelta por Einstein, quien se vió precisado a someter a una profunda crítica los conceptos de espacio y tiempo. Por su parte, ERWIN SCHRÖDINGER se convertiría en uno de los padres de la mecánica cuántica.

Hijo único, SCHRÖDINGER creció en una familia con marcados intereses científicos y culturales. Hasta la edad de 11 años tuvo un profesor privado. Luego asistió al Gimnasio Académico de su ciudad, en donde recibió una amplia formación clásica. Stefan Zweig nos ha dejado sus recuerdos sobre la rigidez de las escuelas austriacas de comienzos de siglo, con su atmósfera árida y desconsoladora<sup>5</sup>. Sin duda el estudio del griego, el latín y las humanidades fundamentaron el permanente interés del futuro físico por los idiomas, la filosofía y la literatura, pero el ambiente de la Viena de 1900, verdadera metrópoli europea y reconocido centro cultural, debió influir de manera definitiva.

A finales del siglo XIX la Mecánica, el Electromagnetismo y la Termodinámica eran disciplinas bien establecidas. La Mecánica de Newton consideraba la materia como una estructura discontinua de puntos dotados de masa. No obstante, en aplicaciones como la Hidrodinámica y la Teoría de la Elasticidad adoptaba una representación continua. Por su parte, la Óptica, el Electromagnetismo y la Termodinámica utilizaban estructuras continuas. Pero pronto comenzaron a proliferar las representaciones discontinuas. Los químicos reconocían la utilidad de la

teoría atómica y la empleaban a menudo; las leyes de la electrólisis de Faraday sugerían también discontinuidades para la electricidad. Clausius, Maxwell y Boltzmann, valiéndose de los conceptos de átomo y molécula, construían teorías de la materia, buscando una explicación a ciertas nociones termodinámicas como la entropía. Lorentz desarrollaba una nueva teoría de la electricidad en la que hacían su aparición cargas eléctricas corpusculares.

Entre 1890 y 1900 las evidencias experimentales en favor de estructuras discontinuas de la materia y la electricidad se multiplicaron. Las descargas en los tubos de Crookes y el estudio de los rayos catódicos mostraban el transporte de electricidad negativa por parte de corpúsculos pequeños y muy livianos a los que se comenzó a llamar electrones. Pronto se los halló desprendiéndose de ciertos metales sometidos a una radiación luminosa de longitud de onda suficientemente corta. Se hacían experimentos con ellos; se medían sus trayectorias y se los desviaba por medio de campos magnéticos. Lorentz, suponiendo que la radiación era el resultado del movimiento de los electrones en los átomos, predijo que las rayas del espectro de una fuente luminosa se modificarían en presencia de un campo magnético. La experiencia de Zeeman, en 1896, confirmó sus predicciones.

Hacia 1900 muchos químicos y físicos de renombre creían en la realidad de las moléculas y los átomos. Las numerosas determinaciones del número de Avogadro dieron prácticamente el mismo resultado y diez años después los partidarios de la estructura atómica podían considerarse triunfantes. Al propio tiempo la teoría cinética de la materia, que bajo el nombre de Mecánica Estadística había sido desarrollada por Boltzmann y Gibbs, cosechaba grandes éxitos en la interpretación de las leyes de los gases y en la predicción de fenómenos completamente extraños a las concepciones de la termodinámica clásica como el movimiento browniano, a la vez que precisaba el sentido de la segunda ley de la Termodinámica.

La teoría de los cuantos se originó en las investigaciones sobre el cuerpo negro, llamado así por Kirchhoff en 1859<sup>6</sup>, en virtud de que su coeficiente de absorción de energía radiante es igual a 1; puede absorber según esto todas las radiaciones y en consecuencia puede emitir las todas bajo la influencia de la temperatura. En mismo Kirchhoff dió una definición operacional de un sistema que actúa como un cuerpo negro: una cavidad que se mantiene a temperatura constante, en donde no puede

penetrar radiación alguna, se comporta, en cuanto a la intensidad y calidad de la radiación presente dentro de ella, como un cuerpo negro a la misma temperatura. La distribución de la energía radiante, con respecto a las diferentes frecuencias, es independiente de la forma de la cavidad o del material de que está hecha y depende sólo de la temperatura. En 1884, Boltzmann demostró teóricamente que la energía total irradiada por un cuerpo negro es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta<sup>7</sup>.

Para la distribución de la energía radiante, en términos de la frecuencia, se habían propuesto dos fórmulas: la de Wilhelm Wien, en 1896, que funcionaba correctamente para las ondas cortas, pero era incompatible con los resultados experimentales para las ondas largas, y la de Rayleigh y Jeans que, por el contrario, era justa para las ondas largas pero inaplicable en el extremo opuesto del espectro. Lo que se necesitaba era una expresión que estuviera de acuerdo con los valores experimentales en todo el rango de longitudes de onda y, para encontrarla, era necesario analizar los intercambios de energía entre radiación y materia.

Max Planck, nacido en Kiel en 1858, formado en la Universidad de Munich, había sido llamado en 1889 a Berlín para suceder a Kirchhoff. El 19 de octubre de 1900, ante la Sociedad Alemana de Física, fue leído un trabajo suyo, en el que se formulaba la celebrada ley de radiación, en acuerdo excelente con las medidas experimentales a temperaturas diferentes. Con todo, la justificación teórica era incompleta. Volvió pues a sus cálculos y el 13 de diciembre leía ante la Sociedad una comunicación en que la fórmula recibía el fundamento teórico. Simultáneamente nacía una nueva rama de la física, la teoría cuántica.

Para lograr este brillante resultado había partido Planck de una de las propiedades ya enunciadas del cuerpo negro, según la cual la repartición espectral de la energía radiante no depende del material de las paredes de la cavidad. Siendo esto así, representó la materia por medio de un gran número de osciladores, dotado cada uno de una frecuencia propia, que pueden emitir y absorber radiación de dicha frecuencia. Encontró entonces necesario admitir que la energía promedio de uno cualquiera de los osciladores de frecuencia  $\nu$  debía ser un múltiplo entero de  $h\nu$  y que la cantidad más pequeña de energía que podía ser absorbida o emitida era igual a  $h\nu$ , siendo  $h$  una constante fundamental, cuyo valor numérico halló luego al comparar la expresión obtenida con los resultados experimentales.

Esta atrevida hipótesis implicaba una discontinuidad de los movimientos posibles de una partícula en un campo de fuerzas, completamente novedosa y extraña a las concepciones clásicas. La emisión de cuantos podía quizá conciliarse con la idea maxwelliana de ondas y campos electromagnéticos continuos. Pero la absorción por cuantos parecía traer consigo la existencia de una estructura discontinua de la energía radiante, en contradicción con las teorías ondulatorias de Fresnel y Maxwell. El mismo Planck vacilaba en extraer las conclusiones que parecían desprenderse de todo el asunto, adoptando una actitud conservadora. Sostenía que si la emisión de un oscilador tenía lugar por cuantos, las ecuaciones de Maxwell retenían su validez a suficiente distancia del oscilador pero debían modificarse en su interior y en las vecindades de éste.

Albert Einstein, por el contrario, convirtió la hipótesis de Planck en algo más revolucionario aún, al afirmar que la radiación también estaba formada por paquetes o cuantos de energía  $h\nu$ <sup>8</sup>.

En su contribución de marzo de 1905 explicó, con base en dicha hipótesis, el llamado efecto fotoeléctrico<sup>9</sup>. En mayo del mismo año, los editores de "Annalen der Physik" recibieron su memorable artículo sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento, seguido por otro, en septiembre, en donde aparecía por primera vez la famosa fórmula  $E = mc^2$ .

La cuantización de la radiación y su asimilación a una legión de corpúsculos no sólo representaban en cierto modo la resurrección del cadáver de la teoría corpuscular de la luz sino una insurgencia aventurada en contra de la validez de las sacrosantas ecuaciones de Maxwell en el vacío. Así se explica la resistencia que encontró la hipótesis en la comunidad de los físicos. Aunque las verificaciones experimentales mostraron poco a poco la vigencia de la expresión propuesta por Einstein como explicación del efecto fotoeléctrico, la suposición fundamental seguía considerándose inaceptable.

El mismo Einstein sintetizó en 1909 su opinión sobre el estado de la teoría de la radiación:

"Traté de mostrar antes que los actuales fundamentos de la teoría de la radiación tienen que ser abandonados. . . En mi opinión, la próxima fase en el desarrollo de la física teórica nos traerá una teoría de la luz que podrá ser interpretada como una especie de fusión de las teorías

ondulatoria y la teoría de la emisión. . . La estructura ondulatoria y la estructura cuántica. . . no deben considerarse como mutuamente incompatibles. . . Parece inferirse de la ley de Jeans que tendremos que modificar nuestras teorías actuales, sin abandonarlas del todo<sup>10</sup>".

Por entonces ERWIN SCHRÖDINGER estudiaba en la Universidad de Viena, a donde había ingresado en 1906. Allí fueron sus profesores Fritz Hasenöhl en física teórica, Franz Exner en Física Experimental y Wilhelm Wirtinger en Matemáticas. Sobre su estadía en la Universidad se expresaría posteriormente, en su discurso de posesión como miembro de la Academia Prusiana de Ciencias, en 1929, así:

"El viejo Instituto vienés, que lloraba todavía la trágica pérdida de Ludwig Boltzmann, el edificio en donde Fritz Hasenöhl y Franz Exner llevaron a cabo su trabajo y en donde ví a muchos alumnos de Boltzmann yendo y viniendo, me dió la percepción directa de las ideas que habían sido formuladas por esa gran mente. Su línea de pensamiento puede llamarse mi primer amor en ciencia. Nadie me ha cautivado nunca de ese modo, ni lo hará de nuevo<sup>11</sup>".

Luego de obtener su doctorado en 1910, se convirtió el año siguiente en el asistente de Exner. Adquirió entonces gran maestría en el manejo de problemas de valores propios en la Física de los medios continuos y en la teoría de las vibraciones, estableciendo de esta manera las bases para su trabajo futuro.

Entre tanto, el joven Niels Bohr viajaba de Dinamarca, su país natal, a Inglaterra con el fin de completar sus estudios. Después de permanecer un año en Cambridge, pasó a Manchester en donde enseñaba el profesor neozelandés Ernest Rutherford. Este había recibido, en 1908, el premio Nobel de Química por sus trabajos sobre la radiactividad, y había propuesto poco después un modelo de átomo parecido a un sistema solar en miniatura, en que los electrones giraban alrededor del núcleo, cuya carga positiva era compensada exactamente por la negativa de aquellos. Este modelo se mostró incapaz de explicar los espectros de rayas puesto que de acuerdo con la teoría de Maxwell, debía emitir radiación de todas las frecuencias y era, además, inestable.

Bohr aceptó el modelo de Rutherford pero le introdujo postulados adicionales a saber:

- a) Los electrones, pueden moverse sólo en órbitas privilegiadas, aquellas para las cuales la variable de acción es un múltiplo entero de la cons-

tante de Planck. Entonces se dice que el átomo está en estado estacionario; en tal situación no puede absorber ni emitir energía.

- b) El átomo puede pasar, mediante una transición brusca de un estado estacionario a otro. Esta transición va acompañada de la emisión o absorción de un cuanto de energía, es decir,  $E_2 - E_1 = h\nu$ , en donde  $h$  es la constante de Planck y  $\nu$  la frecuencia de la radiación.

Estos postulados violaban claramente las leyes clásicas de la Mecánica y el Electromagnetismo. El segundo constituía, por otra parte, una generalización del principio de Einstein para el efecto fotoeléctrico.

El átomo de Bohr, formulado en 1913, explicaba muchas de las frecuencias presentes en el espectro del Hidrógeno. Con las adiciones y precisiones introducidas por Sommerfeld en 1916, quien consideró órbitas elípticas y tuvo en cuenta la Relatividad, se podía entender una amplia gama de características espectroscópicas, incluyendo algunos aspectos de la estructura fina.

Mientras tanto estallaba la primera Guerra Mundial en la que SCHRÖDINGER participó como oficial de artillería en el frente del suroeste. Su profesor, Fritz Hasenöhrl caería en octubre de 1915, cerca de Folgarina, en el frente italiano. En el bando opuesto, un francés de familia noble, a quien volveremos a encontrar, prestaría servicio como operador de radio en un puesto de la torre Eiffel, en París. Al final de la guerra SCHRÖDINGER estaba casi decidido a abandonar la física teórica en favor de los estudios filosóficos, pero le fue ofrecida una posición académica en Chernovtsy, Rumania, perteneciente en ese tiempo al imperio Austro-húngaro. La oportunidad no se concretó, al derrumbarse al imperio mismo como resultado de la guerra, pero sirvió para disuadirlo y hacerle volver a la física.

En 1920 se casó SCHRÖDINGER con una muchacha de Salzburgo, Annemarie Bertel, y partió con ella a trabajar con Max Wien en Jena. Allí permaneció durante un semestre. Después de breves estadías en Stuttgart, como profesor extraordinario, y en Breslau como profesor ordinario, fue nombrado profesor de física matemática en la Universidad de Zurich, donde permaneció seis años. Allí surgiría, en 1926, la mecánica ondulatoria.

Pero volvamos atrás. Hemos visto cómo el átomo de Bohr podía explicar muchas propiedades del espectro del Hidrógeno y de átomos "parecidos al Hidrógeno", o sea aquellos que conservan un electrón

periférico, por ejemplo el Helio ionizado. No obstante, la teoría era incapaz de predecir diversos atributos del espectro del mismo Helio en estado neutro. Por supuesto, tampoco podía prever la intensidad y el estado de polarización de la radiación emitida. Para remediar tal situación Bohr postuló el principio de correspondencia, que permite pasar sin solución de continuidad de los fenómenos de naturaleza cuántica a las manifestaciones aparentemente continuas del mundo macroscópico.

A pesar de éste y otros refinamientos importantes, se estaba en presencia de una teoría híbrida, construida con base en la mecánica de las partículas, a la cual se superponían restricciones cuánticas enteramente extrañas, y plagada de reglas empíricas sin fundamento teórico. Sus éxitos eran notables pero en muchos casos no concordaba con la experiencia. Se necesitaba una profunda reflexión conceptual.

Una primera tentativa en este sentido apareció en dos comunicaciones dirigidas a la Academia Francesa de Ciencias, en septiembre de 1923, y fue desarrollada luego en una tesis de doctorado defendida en noviembre de 1924 por Louis Victor, príncipe De Broglie.

Nacido en Dieppe, Francia, el 15 de agosto de 1892, de una familia noble de origen piemontés cuyos antepasados habían sido desde el siglo XVII mariscales, ministros y diplomáticos, Louis Victor quebrantó la tradición familiar, al igual que su hermano mayor Maurice. Físicos ambos, éste había montado en su mansión parisense un excelente laboratorio en donde se trabajaba sobre todo la espectroscopia de Rayos X. A los 18 años comenzó Louis a estudiar Física en la Sorbonne, pero simultáneamente se matriculó en Historia con el objeto de dedicarse a la diplomacia. Finalmente declinó el tema de tesis en Historia que le había sido asignado y escogió uno en Física. En 1919, luego de haber servido durante la guerra como operador de radio, entró al laboratorio de Maurice donde hubo de familiarizarse con cuestiones relativas a la naturaleza de la radiación electromagnética y con las ideas de Planck y Einstein. Desde 1920 fue profesor de física teórica en el Instituto Henri Poincaré, de donde se retiró en 1962. Ganó el Premio Nobel de Física en 1929, por su descubrimiento de la naturaleza ondulatoria del electrón.

La idea desarrollada por De Broglie estaba basada en la siguiente consideración:

En muchos experimentos la radiación ponía de manifiesto propiedades ondulatorias pero en otros se comportaba como si tuviera una estructura discreta, corpuscular. ¿Tal dualidad no se manifestaría también en la materia? Como lo expresara el mismo De Broglie: “Después de una larga reflexión en la soledad y mucha meditación tuve de pronto una idea, durante el año de 1923: pensé que el descubrimiento hecho por Einstein en 1905 debería generalizarse a todas las partículas materiales, especialmente a los electrones<sup>12</sup>”.

Así como Einstein había asignado energía y momentum a los fotones de modo que permaneciera válida la relación entre estas dos magnitudes para las ondas de la teoría electromagnética, De Broglie buscaba construir una teoría sintética de ondas y corpúsculos en la cual éstos aparecieran como accidentes incorporados a la estructura de aquellas y fueran guiados por su propagación. Inspirándose en las consideraciones mencionadas, De Broglie obtuvo, con base en razonamientos relativistas, las relaciones que ligan la energía y el momentum del corpúsculo con la frecuencia y la longitud de onda de la vibración asociada, de modo que la velocidad del electrón era igual a la velocidad de grupo de las ondas. Aplicadas al fotón, las fórmulas reproducían las de Einstein. Una onda luminosa se podía interpretar, en principio, como la onda de De Broglie asociada al fotón. La nueva teoría sugería, además, un significado para las condiciones de cuantización de Bohr<sup>13</sup>.

Paul Langevin, uno de los examinadores de De Broglie, envió una copia de la tesis a Einstein, quien poco después manifestaba en una carta a Lorentz: “Un hermano menor de. . . De Broglie (se refiere con seguridad a Maurice) ha emprendido una muy interesante tentativa de interpretación de las reglas de cuantización de Bohr-Sommerfeld (París, tesis de 1924). Creo que se trata de un débil rayo de luz sobre el más complejo entre nuestros enigmas físicos<sup>14</sup>”.

De Broglie había previsto incluso un experimento consistente en difractar un haz de electrones mediante un cristal, para detectar las ondas de materia; el espaciado regular entre los átomos del cristal haría las veces de las rendijas en la experiencia análoga de la difracción de la luz, siendo lo suficientemente reducido para difractar las vibraciones asociadas a los electrones, de longitud de onda pequeñísima. Aunque ya se habían detectado estos efectos al utilizar haces de electrones para el estudio de cristales, sólo cuando SCHRÖDINGER desarrolló una nueva teoría que incorporaba y ampliaba los logros de De Broglie, se vio la

urgencia de una comprobación experimental. Davisson y Germer, dos físicos norteamericanos, verificaron en 1927 la hipótesis de De Broglie. Quedó así establecida la evidencia experimental de la dualidad onda-partícula.

La aplicación de las ideas de De Broglie a la Teoría Cuántica de gas ideal por parte de Einstein, y sus agudas opiniones sobre las mismas, atrajeron la atención de los físicos sobre las concepciones del francés. SCHRÖDINGER relató a Dirac de qué manera había llegado a su gran descubrimiento:

“En sus trabajos sobre espectros usaba, por supuesto, la teoría de las órbitas de Bohr, pero pensaba siempre que las cuantizaciones en esta teoría eran poco satisfactorias y que el espectro atómico debería determinarse a partir de un problema de valores propios, surgiendo así de modo natural. En 1924 De Broglie publicó su trabajo sobre las ondas asociadas al movimiento de las partículas libres. Este trabajo influyó profundamente en SCHRÖDINGER, quien comenzó a tratar de generalizar las ondas de De Broglie a partículas ligadas. Obtuvo finalmente una solución clara del problema, en que los niveles de energía aparecían como los valores propios de un operador. Inmediatamente aplicó los resultados al átomo de Hidrógeno, teniendo debidamente en cuenta la mecánica relativista para el electrón, como había hecho De Broglie. Los resultados no concordaban con la observación. Hoy sabemos que el método de SCHRÖDINGER era correcto y que la discrepancia se debió a que no tuvo en cuenta el espín del electrón, desconocido entonces. SCHRÖDINGER se llevó una gran desilusión, concluyó que el método no servía y lo abandonó. Después de algunos meses volvió al tema y se dió cuenta que, si se consideraba el electrón no relativista, el método daba resultados acordes con la observación, en la aproximación no relativista. Escribió entonces el trabajo y lo publicó en 1926. Así se presentó ante el mundo, atrasada, la ecuación de onda de SCHRÖDINGER<sup>15</sup>”.

Para SCHRÖDINGER la falla de la física clásica para explicar los fenómenos cuánticos era análoga a la incapacidad de la Óptica geométrica para interpretar la interferencia y la difracción de la luz. Se necesitaba una ecuación diferencial que diera las ecuaciones de movimiento clásicas por un proceso similar al que permitía obtener la Óptica geométrica de la Óptica física; pasar de las ondas a los rayos luminosos. Ahora bien, como la ecuación de los frentes de onda de las ondas de De Broglie se pueden obtener igualando a cero la función principal de Hamilton,

resulta que la ecuación de Hamilton-Jacobi en dinámica corresponde al principio de Huygens de la óptica y las ondas de De Broglie con análogas a los rayos de la óptica geométrica. SCHRÖDINGER se propuso entonces encontrar, en conexión con las ondas de De Broglie, la teoría análoga a la óptica física.

Poco después de su gran descubrimiento, mostraba SCHRÖDINGER la equivalencia entre su formalismo y el hallado por Heisenberg. Dos concepciones diferentes en apariencia se encontraron así unificadas. Sus aportes de 1926 le valieron el Premio Nobel de Física, que compartió con Dirac en 1933<sup>16</sup>.

En 1927 sucedió a Planck en la Universidad de Berlín, uniéndose a un notable grupo de físicos entre los que se encontraba Einstein. Pero la República de Weimar estaba ya condenada. La crisis política y social culminó con el nombramiento de Hitler como canciller del Reich en enero de 1933. En marzo el Parlamento votó los plenos poderes para el canciller y en julio el nacional socialismo era declarado único partido legal. Ante la situación SCHRÖDINGER abandonó Alemania y estuvo en Oxford por un tiempo, pero en 1936 aceptó un cargo en Graz, a pesar de la situación incierta de Austria. Con la anexión de ésta por Alemania, en 1938, comenzaron de inmediato las dificultades para SCHRÖDINGER, quien, a la postre, logró pasar la frontera italiana. De allí, después de un breve lapso en Princeton, fue a Dublín, en donde el premier Edmond de Valera, matemático antes de convertirse en político, había creado el Instituto de Estudios Avanzados. SCHRÖDINGER fue su director y permaneció en Dublín hasta su retiro en 1955.

Durante este tiempo continuó sus investigaciones y publicó numerosos artículos. Algunos tuvieron que ver con la unificación del electromagnetismo y la gravitación, problema que ocupó a Einstein por muchos años y que no ha sido resuelto hasta hoy. Siguió interesado en los fundamentos de la física atómica pero jamás aceptó la interpretación probabilística de Born, que implicaba el abandono de la causalidad.

Entre todos los físicos de su generación SCHRÖDINGER sobresale por su extraordinaria versatilidad intelectual. Humanista auténtico, atacó vigorosamente el utilitarismo en la ciencia y mantuvo una posición crítica y lúcida frente al problema del especialismo, enfermedad infantil de la cultura contemporánea.

## NOTAS

1. Los periódicos de Bogotá registraron apenas la noticia. Perdido entre los informes acerca del rompimiento de relaciones entre Estados Unidos y Cuba, y el referendun de De Gaulle sobre Argelia, apareció un breve despacho de la Agencia France Press en "El Tiempo" (6 de enero). Posteriormente la noticia mereció sendos comentarios: Uno de Antonio Panesso en "El Espectador" (9 de enero), en el que se destacan los aspectos humanísticos de la personalidad de SCHRÖDINGER, y otro de Alfredo Trendall en la "La República" (8 de enero), en donde se habla de la Mecánica Cuántica y de los aportes del físico vienés, en forma confusa e imprecisa.
2. El inventor de la balanza para determinar densidades relativas.
3. Se trataba de una repetición refinada del experimento realizado en Berlín por el mismo Michelson, en 1881.
4. A.E. Moyer, Michelson in 1887, Physics Today, mayo de 1987, pág. 50.
5. Stefan Zweig, El mundo de ayer, Editorial Juventud, Barcelona, 1952.
6. El mismo año, en septiembre, Le Verrier presentó una comunicación a la Academia Francesa de Ciencias, en la que se consignaba un inexplicable avance en el perihelio de Mercurio. Como es sabido, Einstein daría la explicación del fenómeno, en 1915, con base en la Relatividad General.
7. Antes, en 1879, Josef Stefan habían pensado que la energía total irradiada por un cuerpo caliente era proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta.
8. Sólo hasta 1916 los paquetes o corpúsculos de energía fueron dotados de momentum  $h\nu/c$  por el mismo Einstein. La palabra fotón fue propuesta por primera vez por Gilbert Lewis, fisicoquímico de Berkeley, en 1926. Ver A. Pais, "Subtle is the Lord. . ." The Science and the Life of Albert Einstein, Oxford University Press Paperback, New York, 1933. pág. 407.
9. El efecto fotoeléctrico consiste en que si un haz de luz monocromática de frecuencia  $\nu$  incide sobre una superficie metálica, ésta emite electrones. Si la frecuencia es inferior a un cierto límite no hay emisión. Por otra parte, la energía cinética de los electrones depende sólo de la frecuencia de la radiación incidente. Esto es completamente ininteligible desde el punto de vista clásico de los intercambios continuos de energía, pero de claridad meridiana si se acepta la discontinuidad de la radiación.
10. A. Pais, Op. cit., pág. 404. La traducción es mía.
11. M. Jammer, The conceptual development of Quantum Mechanics, Mc Graw Hill, New York, 1966, pág. 255.
12. L. de Broglie, Recherches sur la Théorie des Quanta, Masson, Paris, 1963, pág.4, La traducción es mía.

13. En efecto, si el electrón se mueve en una órbita estable alrededor del núcleo, la onda asociada debe ser también estable, así que ésta debe presentar la misma fase después de una revolución completa del electrón y el perímetro de la órbita será un múltiplo entero de la longitud de onda; de otro modo resultarían interferencias destructivas. Pero esto equivale a decir que la acción es un múltiplo entero de la constante de Planck.
14. A Pais, Op. Cit., pág. 436, La traducción es mía.
15. P.A.M. Dirac, 1961, Profesor Erwin Schrödinger-Obituary, Nature, 189, pág. 355, La traducción es mía.
16. Un análisis de los aportes fundamentales de P.A.M. Dirac rebasa el marco de este trabajo.

## REFERENCIAS

Además de las obras y artículos citados en el texto se dan las siguientes referencias de carácter general:

- E. Whittaker, A History of the theories of Aether and Electricity, Vol. II, Humanities Press, New York, 1973.
- A. d'Abro, The rise of the new Physics, Vol. II, Dover, New York, 1951

TEORIA CUANTICA  
ALGUNAS CONSECUENCIAS FILOSOFICAS,  
CIENTIFICAS Y TECNOLOGICAS

CICLO DE CONFERENCIAS EN  
EL CENTENARIO DE

ERWIN SCHRÖDINGER  
1887 - 1963

2

*GUILLERMO CASTILLO T. Miembro de Número Academia de Ciencias Exactas, Física y Naturales. Profesor Departamento de Física, Facultad de Ciencias Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.E. - Colombia.*

## LA ECUACION DE SCHRÖDINGER Y EL NACIMIENTO DE LA MECANICA ONDULATORIA

2

*GUILLERMO CASTILLO T.*

Como ya se explicó en otra conferencia de este mismo ciclo, en 1926, cuando SCHRÖDINGER dedujo su famosa ecuación, hacía poco se había hecho conocer la hipótesis de De Broglie, sobre las ondas del mismo nombre que acompañan a las partículas materiales, es decir con masa en reposo diferente de cero. Recordemos a este respecto que la longitud de onda correspondiente viene dada por

$$\lambda = \frac{h}{m v} \quad (1)$$

y la frecuencia

$$V = \frac{E}{h} = \frac{2\pi E}{h} \quad (2)$$

siendo  $m$ ,  $v$  y  $E$  la masa, la velocidad y la energía de la partícula respectivamente.

Por otra parte, se conocía ya una notable analogía entre la óptica geométrica y la Mecánica Clásica. Para llegar a ella se puede usar la conocida ecuación de Hamilton-Jacobi (1).

$$W(g, t) = S(g) - Et$$

válida cuando la función Hamiltoniana  $H$  es constante del movimiento e igual a la energía total  $E$ .

$W$  es la función hamiltoniana de acción

$$W = \int (T-V) dt$$

y  $S$  es la función característica de Hamilton. Como  $S$  no depende del tiempo, las superficies de  $S$  constante son fijas en el espacio de configuración; no ocurre lo propio con las superficies de  $W$  constante, que se van moviendo. Así una superficie de  $S$  constante y una de  $W$  constante pueden coincidir para  $t = 0$ ; pero para un tiempo posterior  $dt$ , la superficie de  $W$  constante coincide con otra superficie de  $S$  constante. Entonces, las superficies de  $W$  constante avanzan como frentes de onda en el espacio de configuración.

$$\begin{array}{l} S = a \\ \left. \vphantom{S = a} \right\} \\ W(0) = a \end{array} \qquad \begin{array}{l} S = a + Edt \\ \left. \vphantom{S = a + Edt} \right\} \\ W(dt) = a \end{array}$$

La velocidad de fase de esta onda es

$$\mu = \frac{ds}{dt} \quad (4)$$

siendo  $ds$  lo que avanza la onda en el tiempo  $dt$ .

Como se ve en la Figura 1, en el tiempo  $dt$ ,  $S$  cambia en la cantidad  $Edt$ .

Pero el gradiente de  $S$  es, en magnitud,

$$|\nabla S| = \frac{dS}{ds}$$

y entonces

$$\mu = \frac{E}{|\nabla S|} \quad (5)$$

Según la ecuación de Hamilton-Jacobi

$$\frac{1}{2m} \left[ \left( \frac{\partial S}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial S}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial S}{\partial z} \right)^2 \right] + V = E$$

o bien

$$(\nabla S)^2 = 2m(E-V) \quad (6)$$

con lo que la velocidad de fase queda

$$\mu = \frac{E}{\sqrt{2m(E-V)}} \quad (7)$$

o también

$$\mu = \frac{E}{\sqrt{2mT}} \quad (8)$$

siendo  $T$  la energía cinética.

Ahora, es posible demostrar que la óptica física tiende a la geométrica si  $\lambda \rightarrow 0$  (2).

En efecto, consideremos la ecuación de las ondas electromagnéticas

$$\nabla^2 \phi = \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \quad (9)$$

siendo  $\phi$  el potencial escalar y  $n$  el índice de refracción.

Para tener una situación similar a la de la ecuación de Hamilton-Jacobi,  $n$  varía lentamente.

En tal caso, la solución de (9) es de la forma

$$\phi = e^{\Lambda(\underline{r})} e^{ik_0(L(\underline{r}) - ct)} \quad (10)$$

$k_0$  es el número de onda en el vacío,  $A$  es un factor de amplitud y  $L$  la longitud óptica, estas dos últimas, funciones de posición.

Después de algunas manipulaciones matemáticas, sencillas pero tediosas, la ecuación de ondas (9) queda, para este caso

$$ik_0 \{ 2\nabla A \cdot \nabla L + \nabla^2 L \} \phi + k_0^2 [n^2 - (\nabla L)^2] \phi = 0$$

Siendo A y L reales, la parte real y la imaginaria deben anularse por separado

$$\nabla^2 + (\nabla A)^2 + k_0^2 (n^2 - (\nabla L)^2) = 0 \quad (11)$$

$$\nabla^2 L + 2\nabla A \cdot \nabla L = 0 \quad (12)$$

n no debe variar apreciablemente en una longitud de onda, que entonces debe ser mucho más pequeña que las otras longitudes. Entonces

$$k_0^2 = \frac{4\pi^2}{\lambda_0^2} \quad \text{debe ser el factor predominante, lo que conduce a}$$

$$(\nabla L)^2 = n^2 \quad (13)$$

llamada comunmente ecuación eikonal de la óptica geométrica. Tiene la misma forma que la ecuación (6), obtenida de la ecuación de Hamilton-Jacobi. También puede obtenerse otro resultado, recordando el principio de la mínima acción

$$\delta \int \sqrt{2mT} \, dS = 0 \quad (14)$$

que según lo anterior se puede escribir

$$\begin{aligned} \delta \int n \, dS &= 0 \\ \text{o bien} \\ \delta \int \frac{dS}{\mu} &= 0 \end{aligned} \quad (15)$$

que es el principio de Fermat o del mínimo tiempo de la Óptica Geométrica, obtenido a partir del principio de la mínima acción.

En resumen, lo que según parece Debye ya conocía en 1911, era que en el límite de  $\lambda \rightarrow 0$ , se obtiene a partir de las ondas electromagnéticas el teorema eikonal de la Óptica Geométrica.

Este, por otro lado, tiene una forma análoga a una ecuación obtenida de la ecuación de Hamilton-Jacobi.

Hay pues una relación estrecha entre la Óptica Geométrica y la Mecánica Clásica.

ERWIN SCHRÖDINGER, cuyo centenario estamos celebrando escribió en 1926 una serie de artículos publicados en *Annalen der Physik*, donde desarrolló prácticamente toda la Mecánica Ondulatoria

en el límite no relativista (3), (4), (5), (6) y (7). En su segundo artículo (4) hace un desarrollo como el de arriba que condujo a la condición (7). De ahí en adelante hace notar que la velocidad de la partícula es

$$v = \sqrt{2m(E-V)}$$

mientras la velocidad de fase es  $u = \frac{E}{\sqrt{2m(E-V)}}$ , como ya se había anotado. Luego SCHRÖDINGER obtiene

$$\lambda = \frac{u}{v} = \frac{h}{\sqrt{2m(V-E)}}$$

habiendo usado la ecuación (2) de la teoría de De Broglie.

SCHRÖDINGER, siguiendo a De Broglie, identificó la velocidad de la partícula con la velocidad de grupo de las ondas e hizo notar que si se considera un paquete de ondas cuyo ancho tiende a cero, se mueve siguiendo las leyes de la Mecánica Clásica.

En cuanto a la función de onda, escribió

$$\Psi = \psi(q) \exp(2\pi i(E/h)t) \quad (17)$$

otra vez considerando la ecuación (2) de De Broglie.

Usando la forma general de la ecuación diferencial de un fenómeno ondulatorio

$$\nabla^2 \Psi(q,t) - \frac{1}{\mu^2} \frac{\partial^2 \Psi(q,t)}{\partial t^2} \quad (18)$$

$$\nabla^2 \psi + \frac{8\pi^2 m}{h^2} (E-V)\psi = 0 \quad (19)$$

Que es la que hoy se conoce como la ecuación de SCHRÖDINGER independiente del tiempo.

Quedaba así completa la equivalencia perseguida desde el inicio de esta investigación:

La Mecánica Clásica es a la Óptica Geométrica, como la Mecánica Ondulatoria a la Óptica Física. Recordemos al respecto la ecuación (1) de De Broglie  $\lambda = \frac{h}{p}$

Si intentamos usar el límite de  $\lambda \rightarrow 0$ , que se empleó para pasar de la Óptica Física a la Óptica Geométrica, en (1) tal cosa equivale a tomar  $h \rightarrow 0$  que es en esencia el principio de correspondencia que sirve para pasar de las fórmulas cuánticas a las clásicas. En el caso de la ecuación de SCHRÖDINGER, el método semiclásico WKB (Wentzel-Kramers - Brillouin) (8), (9), (10) hace uso de esta propiedad, muy poco tiempo después de la formulación de la Mecánica Ondulatoria.

En el primero de sus famosos artículos (3), SCHRÖDINGER dedujo su ecuación (19) por un método variacional. Luego la aplicó al problema del átomo de Hidrógeno y obtuvo prácticamente la misma solución que hoy aparece en todos los libros de Mecánica Cuántica. Por otro lado en su segundo artículo (4) obtuvo la solución del problema del oscilador armónico, tal como hoy lo resuelven nuestros estudiantes de Física.

En su tercer artículo (5) atacó el problema de las perturbaciones, teniendo en cuenta el método clásico usado por Lord Rayleigh en su famoso libro sobre sonido (11). De ahí salió el método standard de perturbaciones, independientes del tiempo, generalmente llamado de Rayleigh-Schrodinger, sin el cual la ecuación de SCHRÖDINGER tendría poquísimas aplicaciones.

SCHRÖDINGER consideró no solamente el caso no degenerado sino también el degenerado.

Como una aplicación del método de perturbaciones, SCHRÖDINGER consideró el Efecto Stark en el Hidrógeno.

En el cuarto artículo (6), trató el problema de las perturbaciones dependientes del tiempo. Para esta finalidad no encontró conveniente el uso de su ecuación (19), puesto que ésta es aplicable para estados propios de la energía, es decir, estados estacionarios. Necesitaba pues eliminar la energía, para la cual derivó la expresión (17)

$$\Psi(q,t) = \Psi(q)\exp[2\pi i(E/h)t]$$

con respecto al tiempo y combinando con (19) llegó a la que hoy se conoce como ecuación de SCHRÖDINGER dependiente del tiempo

$$-\frac{h^2}{8\pi^2 m} \nabla^2 \psi + V\psi = \frac{h}{2\pi i} \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (20)$$

La teoría de perturbación dependiente del tiempo, desarrollada por medio de la ecuación (20) fue luego aplicada al caso muy importante de la perturbación armónica. Allí aparecieron las famosas frecuencias de combinación  $WR_0 + W$  y  $WR_0 - W$  ya previstas en teorías anteriores de Borh y Heisenberg. En el lenguaje de hoy decimos que la resonancia  $WR_0 + W = 0$ , es el caso de la emisión estimulada (Laser) y  $WR_0 - W = 0$ , origina la absorción resonante.

Un tema final de este cuarto artículo dedicado al tema general "La Cuantización, un problema de valores propios", se refiere a la interpretación de la función de onda  $\psi$ . Para ello, en el tercer artículo,  $\psi^* \psi$  lo consideró como proporcional a la densidad espacial de la carga eléctrica. En el cuarto artículo le dió a  $\psi^* \psi$  un significado parecido, es decir como una función de densidad que gobierna las fluctuaciones de la densidad de carga eléctrica.

Por esa misma época, Max Born (12) hizo la propuesta de considerar esa expresión  $\psi^* \psi$  como proporcional a la densidad de probabilidad de encontrar la partícula. Esta interpretación ha sido universalmente aceptada. En estos dos artículos Born trató el problema de las colisiones, prácticamente el único importante no considerado por SCHRÖDINGER dentro de los primeros desarrollos de la Mecánica Ondulatoria.

Por la misma época en que se publicaban todos estos resultados importantes, Heisenberg, Born y Jordan (13), (14), (15) desarrollaban la Mecánica Matricial o Mecánica Cuántica usando métodos radicalmente diferentes, basados en el empleo de matrices.

Estos admirables desarrollos no fueron al principio muy bien entendidos porque para muchos de los contemporáneos de Heisenberg, Born y Jordán no eran muy familiares los métodos matriciales (2). El mismo SCHRÖDINGER encontró al principio estos desarrollos poco comprensibles y poco objetivos. Pero para la época de sus cuatro artículos sobre "La cuantización, un problema de valores propios" publicó uno más (7) titulado "Sobre la relación entre la Mecánica Cuántica de Heisenberg, Born y Jordán y la mía".

Allí demostró la equivalencia de los dos métodos. Para ello consideró que a cada matriz cuadrada de Heisenberg corresponde un operador y halló la manera de calcular el elemento de matriz:

$$A_{kj} = \int u_k^* \hat{A} u_j d\underline{r}$$

siendo  $\hat{A}$  el operador; las funciones  $\mu_k$  forman la base de la representación. En la notación de SCHRÖDINGER esto se escribía

$$A_{kj} = \int u_j^* [F, u_k] dq$$

(Hoy empleamos los corchetes para indicar un conmutador).

Para llegar a (21) supuso la función  $\psi$  desarrollada por medio de las funciones que forman la base

$$\psi = \sum a_k u_k \quad (22)$$

que hoy llamamos el postulado del desarrollo.

Las dos formas de atacar el mismo problema, la forma matricial de Heisenberg, Born y Jordán y la Ondulatoria de SCHRÖDINGER, presentan un vivo contraste:

El método matricial destaca el aspecto discontinuo que asocia a las "partículas". Es algebraico desde el punto de vista matemático y como se dijo, trabaja con matrices no conmutables, métodos poco familiar para los Físicos de aquel tiempo.

El método ondulatorio se refiere a algo continuo como son las ondas. Usa métodos analíticos como son las ecuaciones diferenciales, herramienta muy familiar para los contemporáneos de SCHRÖDINGER, puesto que lo habían venido usando en la Física Clásica (2).

Todo el conjunto memorable de artículos que sirvieron de base tanto a la Mecánica Ondulatoria como a la Mecánica Matricial (o Mecánica Cuántica) fueron publicados en un solo año (1926).

Volviendo a la obra de SCHRÖDINGER, todavía debemos citar dos artículos sobre aplicaciones de la Mecánica Ondulatoria: el Efecto Zeeman "normal" (14) (sin spin) y el Efecto Compton (15).

Ante la impresionante serie de realizaciones cabe preguntarse: ¿de qué problemas no se ocupó SCHRÖDINGER? En general, los que incluyen el spin cosa explicable, pues en aquel entonces, la introducción del spin en la Mecánica Cuántica apenas se iniciaba. Citemos algunos de los problemas: la estructura fina, no a la manera de Sommerfeld, el Efecto Zeeman "anómalo", los sistemas de partículas indistinguibles y la Mecánica Cuántica Relativista, problemas resueltos por Heisenberg, Born y Dirac, entre otros.

Pero sus realizaciones fueron de una importancia tal, que una persona tan autorizada como Max Born llegó a afirmar (16): "Su nombre es por cierto el más citado en las publicaciones sobre Física. ¿Quién de nosotros no ha escrito innumerables veces las palabras "Ecuación de SCHRÖDINGER" o "función de SCHRÖDINGER? Probablemente las próximas generaciones harán lo mismo y conservarán vivo su nombre".

## REFERENCIAS

- (1) H. Goldstein. Classical Mechanics. Cap. 9, Addison Wesley (1950), Téngase cuidado con la notación, que no es uniforme en los libros de Mecánica Clásica.
- (2) M. Jammer. Conceptual Development of Quantum Mechanics. Cap. 5, McGraw-Hill (1966).
- (3) E. Schrödinger. "Quantisierung als Eigerwertproblem", Annalen der Physik, 79, 361 (1926). Primera comunicación.
- (4) E. Schrödinger, Ibid, 79, 480 (1926). Segunda comunicación.
- (5) E. Schrödinger, Ibid 80, 437 (1926). Tercera comunicación.
- (6) E. Schrödinger, Ibid 81, 109 (1926). Cuarta comunicación.
- (7) E. Schrödinger, "Über das Verhältniss der Heisenberg - Born - Jordanschen Quantummechanik zu der meinen. Ann. Phys 79, 734 (1926). Los artículos numerados como (3), (4), (5), (6), (7) han sido reproducidos en el libro Dokumente der Naturwissenschaft, Erwin Schrödinger. De Villenmechanik, Ernst Battenberg Verlag, Stuttgart (1963).
- (8) G. Wentzel, Zeitschrift fur Physik, 38, 518 (1926).
- (9) H. A. Krammers, Ibid, 39, 828 (1926).
- (10) L. Brillouin, Comptes Rendus, 183, 24, (1926).
- (11) J. W. Strutt, Baron Rayleigh. The Theory of Sound. Dover, New York (1945).
- (12) M. Born, Zeitschrift fur Physik, 33, 863 (1926).
- (13) W. Heisenberg, Zs. f. p. 33, 879 (1925).  
M. Born, P. Jordan Zs, f. p. 34, 858 (1925).  
W. Heisenberg, M. Born, P. Jordan, 35, 557 (1926).
- (14) E. Schrödinger, Phys, Rev. 28, 1046 (1926).
- (15) E. Schrödinger, Ann. d. Phys. 82, 257 (1927).
- (16) Citado por Armin Hermann en una biografía de Schrödinger incluida en el volumen de "Dokumente" mencionado después de nuestra referencia (7).

TEORIA CUANTICA  
ALGUNAS CONSECUENCIAS FILOSOFICAS,  
CIENTIFICAS Y TECNOLOGICAS

CICLO DE CONFERENCIAS EN  
EL CENTENARIO DE

ERWIN SCHRÖDINGER  
1887 - 1963

3

*BERNARDO GOMEZ M. Departamento de Física, Universidad  
de Los Andes, Bogotá, D.E. - Colombia.*

## VISION DE LA NATURALEZA A TRAVES DE LA MECANICA CUANTICA IMPACTO SOBRE LA FISICA

3

*BERNARDO GOMEZ M*

### MECANICA CUANTICA - DATOS HISTORICOS

Este año celebramos el centenario de ERWIN SCHRÖDINGER, quien nació el 12 de agosto de 1887 en Viena, Austria. Lo recordamos por ser uno de los padres de la mecánica cuántica, el creador de la mecánica ondulatoria.

La historia del descubrimiento de la mecánica cuántica se inicia con Max Planck en el año 1900 con la ley de la radiación del cuerpo negro. En su trabajo Max Planck introduce una nueva constante en la Física: la constante de Planck  $\eta$ , la cual es una medida de la magnitud de la cuantización en los procesos atómicos. El trabajo de Planck implica cuantización en el intercambio de energía. La energía deja de ser una variable continua.

En 1905 Albert Einstein extiende la idea de Planck: Tratando el efecto fotoeléctrico Einstein asume que la luz misma está cuantizada; estos cuantos de luz son los fotones.

Las ideas de Planck y de Einstein que dan comienzo a la teoría cuántica son consecuencia de los resultados experimentales de final del siglo XIX cuando se inicia el contacto directo con procesos atómicos, lo que abre las puertas a la comprensión de la estructura de la materia. Así por ejemplo en 1895 Konrad Röntgen descubre los rayos

-X, al año siguiente Henry Beckerel descubre la radiactividad y dos años más tarde los esposos Curie asilan el radio. En 1897 J. Thomson descubre el electrón. Además la ciencia de la espectroscopia no encuentra explicación para los espectros de emisión y absorción con frecuencias discretas características de cada substancia.

En el siglo XX se destaca Ernest Rutherford. Descubre la transmutación radioactiva de los elementos y en 1911 descubre el núcleo atómico. La casi totalidad de la masa del átomo está concentrada en su centro, en un núcleo muy pequeño de carga eléctrica positiva, mientras que los electrones de masa muy pequeña conforman una nube de carga negativa y de gran extensión alrededor del núcleo, dando así el tamaño del átomo.

Pero la imagen que aparece del átomo presenta dificultades. Según la física clásica los electrones en órbita alrededor del núcleo pierden energía por radiación. Los átomos serían inestables. Entonces Niels Bohr propone un modelo atómico según el cual existen estados estacionarios en el átomo caracterizados por valores discretos de energía; estando el átomo en un estado a otro se produce la emisión de luz con una frecuencia determinada por la diferencia de energías entre el estado inicial y final; además el momentum angular está cuantizado. Este modelo para el átomo de hidrógeno concuerda en forma aceptable con los espectros observados. Pero este modelo deja más preguntas abiertas sobre la estructura atómica que lo que puede explicar.

En Munich Werner Heisenberg estudia bajo la tutoría de Arnold Sommerfeld. En 1921 asisten a las conferencias de Bohr en Göttingen. Heisenberg decide trabajar con Bohr en Copenhague, en el instituto que Bohr acaba de fundar y donde reúne a los jóvenes físicos más brillantes y destacados para estudiar los problemas sobre la estructura del átomo. Allí estos jóvenes impulsan una revolución científica y lo saben: la revolución de la teoría cuántica. Después de un año con Bohr, Werner Heisenberg pasa a Göttingen como asistente de Max Born y en 1925 concibe una nueva mecánica aplicable al átomo. No le interesa tanto qué es el átomo, sino más bien cómo se comporta, cuáles son las reglas de los procesos de transición en el átomo. Encuentra que puede describir los procesos atómicos con arreglos de números que obedecen ciertas reglas. Max Born y Pascual Jordán extienden el trabajo de Heisenberg y completan el formalismo matemático de la nueva mecánica: un álgebra matricial para describir las transiciones atómicas. Heisenberg presenta

sus ideas en el Laboratorio Cavendish en Cambridge, Inglaterra, donde Paul Dirac capta de inmediato la nueva mecánica matricial y hace una publicación demostrando que esta nueva mecánica es una teoría dinámica completa que reemplaza la mecánica clásica. A la misma conclusión llegan Heisenberg en Copenhague, y Born y Jordan en Göttingen. La mecánica cuántica matricial ha nacido. Sus padres son Heisenberg, Born, Jordan y Dirac. Se trabaja duro para aplicarla a problemas concretos, el átomo de hidrógeno por ejemplo.

Mientras tanto en Francia el príncipe Louis De Broglie piensa que si la luz, tan conocida como una onda, a veces se comporta como partícula (fotón), también podría ser que las partículas a veces se comporten como ondas. Relaciona la energía  $E$  y momentum  $p$  de la partícula con la frecuencia  $\nu$  y longitud de onda  $\lambda$  de la onda:  $E = h\nu$ ,  $p = h/\lambda$ , donde  $h$  es la constante de Planck. Einstein promueve las ideas de De Broglie y uno de los físicos que se interesa es ERWIN SCHRÖDINGER.

## ERWIN SCHRÖDINGER

SCHRÖDINGER se educa en un ambiente de la más refinada cultura austriaca. Su padre es condecorado de ciencias naturales, entre ellas la botánica y la química. El joven ERWIN realiza los estudios de Física en Viena, donde todavía están presentes el espíritu y la memoria de Ludwig Boltzmann. Precisamente uno de los discípulos de Boltzmann, Fritz Hasenoechl, brillante físico quien mucho promete es el profesor de SCHRÖDINGER. Los dos combaten en la primera Guerra Mundial al servicio del ejército austriaco; desafortunadamente Hasenoechl cae en combate. SCHRÖDINGER al terminar la guerra trabaja en diversas universidades hasta establecerse en la Universidad de Zurich. Es allí donde se convierte en uno de los descubridores de la mecánica cuántica.

SCHRÖDINGER impresionado por las ideas de Louis De Broglie y por las opiniones al respecto de Debye y de Einstein, intenta generalizar la teoría de De Broglie para partículas ligadas, obteniendo los niveles de energía como los autovalores de cierto operador. SCHRÖDINGER es un experto condecorado del problema del autovalor. Primero trabaja relativísticamente y aplica sus resultados al átomo de hidrógeno, pero no obtiene concordancia con la evidencia experimental. Este intento fallido se debe a no tener en cuenta el spin del electrón; el spin es una idea

muy nueva para la época, a la cual no están acostumbrados los físicos teóricos. Abandona así sus esfuerzos, pero solo transitoriamente. Un par de meses después vuelve al mismo tema, pero utilizando una aproximación no relativista. El éxito entonces es completo: deriva las frecuencias naturales del átomo de hidrógeno, obteniendo magnífica concordancia con los datos experimentales.

Publica sus resultados en enero de 1926 en la revista *Annalen der Physik*<sup>1</sup>, la misma revista en la cual Planck y Einstein han efectuado sus memorables publicaciones. En su artículo SCHRÖDINGER presenta la ecuación:

$$\nabla^2 \Psi(x,y,z) + \frac{8\pi^2 m}{h^2} [E - U(x,y,z)] \Psi(x,y,z) = 0 \quad (1)$$

Se trata de una muy curiosa publicación, pues simplemente pone su famosa ecuación (hoy conocida como "Ecuación de Schrödinger"), básica en la mecánica ondulatoria, y procede a extraer de ella la solución del problema del átomo de hidrógeno. Pero cómo llega a su ecuación queda oculto. Este desarrollo lo presenta SCHRÖDINGER en una segunda publicación<sup>2</sup> en febrero de 1926. Allí demuestra cómo su teoría es una extensión de las ideas de De Broglie y de la mecánica clásica en la formulación de William Hamilton: la nueva mecánica ondulatoria es a la mecánica clásica, lo que la óptica ondulatoria es a la óptica geométrica.

En la ecuación de SCHRÖDINGER  $\nabla^2$  es el operador Laplaciano.

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

E es la energía del sistema y  $U(x,y,z)$  es el potencial que caracteriza el sistema. En el caso del átomo de hidrógeno:

$$U(x,y,z) = \frac{Ze^2}{r} = \frac{Ze^2}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}$$

La función  $\Psi(x,y,z)$  es llamada por SCHRÖDINGER el escalar de campo. La ecuación de SCHRÖDINGER tiene "soluciones aceptables", esto es soluciones para las cuales

$$\int |\Psi(x,y,z)|^2 dx dy dz$$

es finito, sólo para algunos valores especiales de E: los valores propios o eigenvalores. El conjunto de estos valores propios conforman un espectro. En el caso del átomo de hidrógeno SCHRÖDINGER obtiene un espectro discreto igual a los niveles de energía del átomo de Bohr, y un continuo para energías positivas. Así en la mecánica ondulatoria de SCHRÖDINGER la cuantización no es una condición externa, sino está incluida automáticamente. La cuantización es un problema de valores propios de la energía del sistema. Entonces al tratar un sistema especial en la mecánica cuántica de SCHRÖDINGER, la tarea consiste en resolver una ecuación diferencial parcial y calcular sus valores propios y funciones propias.

Aplicando el método al oscilador armónico, SCHRÖDINGER obtiene los valores propios:

$$E = \hbar \omega (n + 1/2)$$

En el caso del oscilador armónico isótropo multidimensional resultan para cada energía  $E(n)$  varias funciones propias. También se trata el rotor rígido de eje fijo y de eje libre, y también la molécula diatómica (oscilando y rotando).

En marzo de 1926 en una tercera publicación<sup>3</sup> en *Annalen der Physik* SCHRÖDINGER demuestra la equivalencia de su mecánica ondulatoria con la mecánica cuántica de Heisenberg-Born-Jordan. Y luego en mayo de 1926 esboza la teoría de perturbaciones independientes del tiempo para sistemas con o sin degeneración y aplica el método al cálculo del efecto Stark en el átomo de hidrógeno, incluyendo intensidades y reglas de selección. En Junio de 1926 presenta la ecuación de SCHRÖDINGER dependiente del tiempo:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \psi + V\psi = i\hbar \dot{\psi} = 0 \quad (2)$$

Esta ecuación también es válida para ondas que no tengan una frecuencia  $\omega$  constante, o sea para estados que no tienen energía  $E$  constante. Así puede tratar sistemas con energía potencial dependiente del tiempo, y en especial desarrollar una teoría de dispersión.

Más adelante extiende SCHRÖDINGER las ecuaciones (1) y (2) al caso de más de una partícula.  $\Psi$  es entonces una función en el espacio de configuración multidimensional.

## INTERPRETANDO LA MECANICA CUANTICA

Pero ¿cómo interpretar la función de onda  $\Psi$ ? para SCHRÖDINGER  $\Psi^*\Psi$  da la densidad de carga eléctrica. Esa idea la ilustra en el caso del oscilador armónico. Pero pronto se vé que esta interpretación no puede ser correcta: si se trata del electrón sería entonces como si este se disolviera en una nube, interpretación muy sospechosa, pues hay razones para suponer que el electrón está localizado en una región muy pequeña del espacio, casi como puntual.

Los trabajos de SCHRÖDINGER son admirados en Copenhague, pero allí Niels Bohr no acepta la interpretación que SCHRÖDINGER le dá a la función  $\Psi$ . En Copenhague entre octubre de 1926 y febrero de 1927, por invitación de Bohr, ERWIN SCHRÖDINGER presenta sus trabajos y se discute allí la interpretación de la mecánica cuántica tan intensa y profundamente hasta quedar extenuados, tanto que SCHRÖDINGER cae enfermo.

Seis meses después de la primera publicación de SCHRÖDINGER, en junio de 1926, en Göttingen Max Born publica una corta comunicación<sup>5</sup> con una interpretación de la función de onda  $\Psi$ . Al mes siguiente trata el tema más detalladamente<sup>6</sup>: Ha estudiado la colisión de electrones sobre átomos. Trata la dispersión del electrón en un potencial de simetría esférica  $V(r)$ , utiliza la ecuación de SCHRÖDINGER independiente del tiempo.

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta\psi + [V(r) - E] \psi = 0$$

y encuentra como soluciones una onda plana incidente

$$\Psi \sim e^{ikz - i\omega t}$$

y una onda de dispersión

$$\Psi = f(k, \Theta) \frac{e^{ikr - i\omega t}}{r}$$

Entonces con una normalización adecuada de la onda incidente

$$|f(k, \Theta)|^2 d\Omega$$

da la probabilidad de que el electrón se desvíe en un ángulo  $\Theta$  dentro del ángulo sólido  $d\Omega$ . Así

$$|\psi(x, y, z)|^2 d\tau$$

da la probabilidad de hallar el electrón en el elemento de volumen  $d\tau$  con las coordenadas  $x, y, z$ . Aparece así la interpretación probabilística de la función de onda.

Las fuertes y prolongadas discusiones en Copenhague entre Bohr, Heisenberg y Pauli sobre la interpretación de la mecánica cuántica resultan muy productivas. En 1927 Heisenberg encuentra el principio de incertidumbre y Bohr en principio de complementaridad. Conjuntamente estos dos principios constituyen lo que se llamó "la interpretación de Copenhague".

En 1928 Erwin SCHRÖDINGER sucede a Max Planck como profesor de física teórica en la Universidad de Berlín y en 1933 recibe el Premio Nobel de Física por su trabajo sobre la mecánica ondulatoria, premio que comparte con Paul A. Dirac. Ese mismo año, molesto con la toma del poder por Hitler, SCHRÖDINGER deja Alemania y se dirige a Inglaterra, Oxford. Pero imprudentemente regresa a Austria, a Graz, precisamente en 1936 cuando Hitler anexa Austria al III Reich. SCHRÖDINGER escapa a Roma, donde busca a Enrico Fermi y obtiene de éste ayuda para asilarse temporalmente en el Vaticano. De allí sale al Instituto de Estudios Avanzados en Dublín, Irlanda, donde permanece hasta 1955. En ese año regresó a Viena, donde vive hasta el final de sus días, enero 4 de 1961.

## EL IMPACTO DE LA MECANICA CUANTICA

Hacia 1927 la mecánica cuántica no-relativista era ya una disciplina completa. Se trataba de la más poderosa herramienta matemática para la explicación de los fenómenos naturales, con un alcance nunca antes visto en la historia de la ciencia.

En especial el impacto del trabajo de SCHRÖDINGER fue inmediato en la Física. En los primeros años de la mecánica cuántica, la formulación de SCHRÖDINGER adquirió mucha popularidad entre los físicos y representó una fuerte competencia a la formulación matricial de

Heisenberg, la cual sólo tuvo una aceptación modesta. El éxito inmediato de la mecánica cuántica de SCHRÖDINGER se debió sin duda a que las matemáticas en la mecánica ondulatoria eran para los físicos de la época algo familiar, todo el método no era matemáticamente diferente de la teoría clásica de ondas. La teoría de SCHRÖDINGER evita las dificultades técnicas de la formulación de Heisenberg. Inclusive las ideas básicas son más fácilmente comprensibles en el trabajo de SCHRÖDINGER. Se dice que alguien tan intelectualmente ágil como Enrico Fermi tuvo ciertas dificultades en asimilar las ideas de Heisenberg, mientras que comprendió de inmediato los trabajos de SCHRÖDINGER y los explicaba a sus alumnos tan pronto eran publicados.

La mecánica ondulatoria permitía aplicarla y llegar rápido a resultados confrontables con datos experimentales. Además dos años antes de las publicaciones de SCHRÖDINGER, en febrero de 1924 en Göttingen Richard Courant y David Hilbert habían publicado un libro titulado "*Methoden der Mathematischen Physik*"<sup>4</sup> que contenía todas las herramientas matemáticas necesarias para la comprensión de los cálculos de SCHRÖDINGER. El mismo SCHRÖDINGER utilizaba este libro al aplicar su ecuación a problemas concretos.

La nueva mecánica cuántica absorbió los esfuerzos de toda la nueva generación de físicos. A partir de 1927 hubo una ola de aplicaciones de la mecánica cuántica en todas las áreas de la Física. Nuevos métodos matemáticos prácticos para su aplicación se desarrollaron, métodos cada vez más sofisticados y avanzados. Con la mecánica cuántica se consiguió la herramienta para la comprensión de la estructura de la materia. En la física atómica la antigua ciencia de la espectroscopia perdió sus misterios; se esclarecieron los espectros atómicos; se entendió la tabla periódica de los elementos, la naturaleza de las uniones químicas y la química molecular. La moderna química cuántica pudo desarrollarse. Y mirando hacia la materia condensada se desarrolló la teoría cuántica de los sólidos. Resultó así la teoría de la conductividad eléctrica, la teoría de bandas de los sólidos y la teoría de los materiales magnéticos. Se pudo tratar los superconductores y los superfluidos y también la teoría de las transiciones de fase de la materia.

Mirando hacia el interior del átomo, hacia el núcleo y las partículas, la mecánica cuántica fue también la base para la comprensión de la estructura del núcleo. Es interesante el enorme éxito obtenido. La física nuclear fue el primer test serio para la mecánica cuántica, pues ésta

nació en el átomo tratando electrones y fotones. En el núcleo por primera vez se aplicó a otras partículas y a otras interacciones, saliendo airoso de la prueba. Se entendieron los decaimientos radioactivos, se desarrollaron modelos nucleares, el modelo de capas, el modelo colectivo, se entendieron los números mágicos en los núcleos, se descubrió y explicó el efecto Mössbauer y también se pudo comprender los procesos de fisión y fusión nuclear con su enorme liberación de energía. Se tuvo así la base para entender la fuente de energía de las estrellas y la astrofísica se convirtió en una ciencia moderna.

## EL DESARROLLO TEORICO CONTINUA

Pero el desarrollo de la teoría no se detuvo en 1927 con el formalismo no relativista de la teoría cuántica. Los mismos físicos que participaron en la creación de la mecánica cuántica no relativista continuaron extendiendo la teoría: se deseaba satisfacer también todos los requisitos del principio de relatividad e incluir el concepto de campo. Se sintetizan así la teoría de campos, la relatividad y la mecánica cuántica. Se cuantifica el campo electromagnético, el campo de electrones, el campo de piones, el campo en interacción débil. Se desarrolla la electrodinámica cuántica, la dinámica electro-débil cuántica y la cromodinámica cuántica y finalmente se trabaja en una teoría de campo unificado.

## TEORIA DE CAMPOS Y MECANICA CUANTICA

El entendimiento de la luz como una onda electromagnética, la radiación emitida por cargas eléctricas en movimiento, los efectos de la radiación sobre cuerpos cargados, todos estos son fenómenos electromagnéticos cuya comprensión se hizo posible gracias a los esfuerzos de físicos como Michael Faraday y James Clerk Maxwell en el siglo XIX. Se introdujo el concepto de campo para explicar los fenómenos electromagnéticos. Con las ecuaciones de Maxwell, que relacionan el campo eléctrico  $E$  y el campo magnético  $B$  con la densidad de carga eléctrica  $\rho$  y con la densidad de corriente  $j$ , y con la fuerza de Lorentz que actúa sobre sistemas con carga y corriente eléctrica en presencia de un campo electromagnético, se tiene la herramienta para tratar estos fenómenos.

La teoría es comprobada por Heinrich Hertz hace exactamente 100 años, cuando nace SCHRÖDINGER, en 1887. Pero esta teoría todavía no se aplica a la radiación atómica.

Con la mecánica cuántica, con la ecuación de SCHRÖDINGER se hizo posible el cálculo de transiciones bajo la influencia de un campo de radiación externo: la absorción de luz y la emisión forzada de un fotón adicional en presencia de la radiación incidente. El campo de la onda de luz incidente era tratado como una perturbación sobre el átomo en su estado inicial. La ecuación de SCHRÖDINGER permitía entonces calcular la probabilidad de transición, la cual resultó proporcional a la intensidad de la onda incidente. Pero todavía no era posible tratar la emisión por transición de un estado alto a uno bajo en el vacío, libre de campo externo.

### LOS TRABAJOS DE PAUL DIRAC

En 1927 con la publicación de Paul A. Dirac "La teoría cuántica de la emisión y absorción de la radiación" se abre la posibilidad de tratar la radiación atómica. La mecánica cuántica debe ser aplicada no solo al átomo a través de la ecuación de SCHRÖDINGER, sino también al campo de radiación. Dirac hace uso de una idea de Paul Ehrenfest y de Peter Debye de describir el campo electromagnético en el espacio vacío como un sistema de osciladores cuánticos. En presencia de átomos o de otros sistemas de partículas cargadas, el acoplamiento entre las partículas cargadas y el campo se da por una energía de interacción:

$$H_1 = e \int \vec{j} \cdot \vec{A} dx^3$$

donde  $j$  es la densidad de corriente de las partículas,  $e$  es la carga eléctrica de las partículas y  $A$  es el potencial vector. Esta expresión es una consecuencia directa de las ecuaciones de Maxwell. El hamiltoniano del sistema combinado tiene la forma

$$H = H_0 + H_1, \quad H_0 = H_{\text{campo}} + H_{\text{átomo}}$$

donde  $H_{\text{campo}}$  es el hamiltoniano que describe el campo radiactivo confinado en un recinto,  $H_{\text{átomo}}$  es el hamiltoniano de SCHRÖDIN-

GER para el átomo aislado. Así  $H_0$  describe el campo y el átomo sin interacción entre ellos. Los efectos de  $H_1$  que dan la interacción entre campo y átomo son tratados como una perturbación sobre el sistema  $H_0$ . Los estados estacionarios de  $H_0$  están caracterizados por  $(\dots n_i \dots; a)$  donde los  $n_i$  son los números de ocupación de los osciladores radiactivos, o sea el número de fotones presentes en cada oscilador  $i$ .  $a$  da el estado estacionario del átomo. Pero estos estados dejan de ser estacionarios cuando se tiene en cuenta la energía de perturbación  $H_1$ . La teoría de entonces las leyes de emisión y de absorción de luz. El número de ocupación es un operador cuántico que se da como un producto de operadores conjugados de creación y aniquilación de fotones para los cuales valen reglas de conmutación correspondientes a la estadística de Bose-Einstein. Se habla aquí de la segunda cuantificación.

El campo radiativo se trata como un sistema de osciladores cuánticos. En la mecánica cuántica, según el principio de incertidumbre de Heisenberg, el oscilador sólo puede estar en reposo si su momentum tiende a infinito. Así tratando el campo radiativo como sistema de osciladores cuánticos aparecen oscilaciones de punto cero de los campos electromagnéticos en el estado de mínima energía. El proceso de emisión espontánea puede entenderse como una consecuencia de estas oscilaciones.

Con este trabajo de Dirac es posible hacer los cálculos de los procesos de absorción y emisión de luz por los átomos. También se tiene alcance a fenómenos de radiación como procesos de dispersión de fotones, fluorescencia de resonancia y dispersión de Compton no relativista de fotones por electrones.

Pero el mismo Dirac señala las serias restricciones de este trabajo: no tiene validez para casos relativistas (debido a que utiliza la ecuación de Schrödinger) y la cuantificación del campo de fotones no se puede aplicar al caso de los electrones, pues estos no se pueden dar como ondas reales. Dirac ataca estos problemas.

En 1928 Paul A. Dirac publica dos artículos sobre una nueva ecuación relativista del electrón. Esta ecuación de Dirac debe reemplazar a la ecuación de Schrödinger cuando energía y momentum del electrón son muy grandes para una aproximación no relativista. El éxito de esta ecuación es inmediato: Como consecuencia natural de la ecuación se obtiene el spin del electrón como  $h/2$ . El factor  $g$  del electrón tiene

necesariamente el valor  $g=2$  y de la ecuación se calcula el momento magnético del electrón. Aplicando la ecuación al átomo de hidrógeno se obtiene concordancia con las observaciones espectroscópicas de la estructura fina.

Además el otro gran éxito de la ecuación relativista del electrón de Dirac está en la teoría de la radiación: el acoplamiento del campo radiactivo cuantificado con la ecuación de Dirac hace posible el cálculo de la interacción de la luz con electrones relativistas. Se derivan entonces la fórmula de Klein-Nishina para la dispersión de luz por electrones, la fórmula de Moller para la dispersión de dos electrones relativistas, y se calcula la emisión de fotones en el proceso de dispersión de electrones por el campo de Coulomb del núcleo.

Pero al lado de los éxitos inmediatos aparecen también dificultades inmediatas: Dirac encuentra como consecuencia de su ecuación relativista del electrón, la existencia de estados de energía cinética negativa o de masa negativa. No es posible eliminarlos y si llevan a consecuencias inaceptables: así por ejemplo el átomo de hidrógeno no sería estable debido a transiciones radiactivas de los estados normales a los estados de energía negativa.

Para resolver el problema de las energías negativas hace Dirac en 1929 una propuesta que tuvo enormes consecuencias ampliando la visión que se tiene sobre la naturaleza de la materia: Como para los electrones vale el principio de exclusión de Pauli, se puede suponer que todos los estados de masa negativa están ocupados normalmente. Estando ocupados todos los estados de masa negativa, no hay la posibilidad de transiciones que parten de los estados positivos. Así se asegura la estabilidad de los átomos. Pero hay además consecuencias interesantes: Un estado no ocupado de masa negativa es equivalente a la existencia de una partícula de masa positiva y carga eléctrica positiva. Es posible el proceso en el cual una partícula del "mar" de estados negativos es "levantada" por absorción de fotones a un estado de energía positiva. Esta sería una partícula normal y habría dejado un agujero en el mar de estados negativos. El agujero se comporta como una partícula de carga positiva. "Se ha creado un par". Pero también el proceso inverso es posible, cuando habiendo un agujero en el mar de estados negativos una partícula "cae al mar" emitiendo fotones y ocupando el agujero. "Se ha aniquilado un par".

Con su propuesta describe Dirac procesos de producción y de aniquilación de pares partícula-antipartícula. Así se llega a descubrir la antimateria. Pero no es fácil aceptar esta teoría. El mismo Dirac piensa en 1929 que un agujero en el "mar" de estados negativos tendría que ser un protón, la única partícula "elemental" con carga positiva conocida entonces, aunque molesta la asimetría en la masa ( $m_{\text{protón}} \approx 1830 m_{\text{electrón}}$ ). Pero Hermann Weyl y Robert Oppenheimer demuestran en 1930 que esto haría nuevamente inestable al átomo de hidrógeno. Un año más tarde Dirac reconoce la necesidad de que los agujeros tengan la misma masa de las partículas y predice así la existencia de nuevas partículas, los "anti-electrones" positivos y de igual masa que los electrones, y los "anti-protones" negativos y de igual masa que los protones. Al año siguiente, 1932, se confirma experimentalmente esta teoría de Dirac: Carl Anderson registrando en una cámara de niebla partículas provenientes de la radiación cósmica descubre el positrón. El anti-protón es descubierto apenas 25 años más tarde por Chamberlain y Segrè en el Bevatrón de Berkeley (1955).

Con la interpretación que da Dirac de los estados de energía negativa, estando estos todos ocupados queda poblado el vacío. Llevando una carga al vacío, ésta polariza el vacío. En torno a la carga hay en el vacío enorme actividad: continua creación y aniquilación de pares de partícula-antipartícula; se les llama partículas virtuales. La carga se rodea de una nube de estas partículas virtuales en creación y destrucción, apareciendo un efecto de polarización. El vacío se comporta como un dieléctrico. Y la masa observable de la carga rodeada de la nube de partículas virtuales viene dada por la masa de la carga "desnuda" (esto es sin nube alrededor) más la masa de la nube. Desafortunadamente los cálculos dan valores infinitos para esta masa.

Es importante que desde entonces se reconoce que debido a las partículas virtuales en cualquier sistema el número de partículas no es constante. Entonces no se puede hablar de un sistema de una o de dos partículas, lo que sí es válido en la mecánica cuántica no relativista.

Pero se han creado dificultades: el vacío se ha poblado y lleva una densidad de carga infinita y una densidad de energía negativa infinita, la polarización del vacío, la masa infinita de la carga eléctrica rodeada de la nube de partículas virtuales. Esto es el comienzo de una serie de dificultades en el desarrollo de la teoría cuántica de campos relativistas, de la electrodinámica cuántica: las divergencias, expresiones y términos

que tienden a infinito. Se requerirán cerca de 20 años para eliminar en forma radical las divergencias. Mientras tanto los físicos se limitan (aunque no muy convencidos) a una física sustractiva: con trucos matemáticos se manipulan las divergencias, restando ciertos términos convenientemente elegidos para eliminarlas.

En los años 30 contribuyen al desarrollo de la teoría cuántica de campos relativistas, además de Paul Dirac, también Pascual Jordan, Wolfgang Pauli, Werner Heisenberg y Enrico Fermi.

### LA ELECTRODINAMICA CUANTICA

Desde los años 30 mediciones espectroscópicas por medios ópticos de la estructura fina de los niveles del hidrógeno indican que no en todos los casos la concordancia es perfecta entre los resultados experimentales y la teoría aplicando la ecuación de Dirac al átomo de hidrógeno. Pero estas evidencias son muy débiles. No es sino hasta 1947 cuando en la Universidad de Columbia en Nueva York, Willis E. Lamb y su estudiante R.C. Retherford utilizando métodos mucho más refinados que la espectroscopia óptica, con una combinación de rayo molecular y técnica de microondas, demuestran que los niveles  $2S_{1/2}$ ,  $2P_{1/2}$  no coinciden. Según los cálculos con la ecuación de Dirac estos dos estados serían degenerados, pero en el experimento se observa con alta precisión que entre ellos hay una pequeña diferencia: el corrimiento Lamb.

Casi al mismo tiempo H. M. Foley y P. Kusch, estudiando la estructura hiperfina en los espectros de sodio y de galio, demuestran que el momento magnético del electrón es anómalo: no es exactamente igual a un magnetón de Bohr, sino algo mayor.

Estos resultados experimentales son presentados en la conferencia de Shelter Island organizada en 1947 por Robert Oppenheimer al estilo de los memorables encuentros de Solvay. El tema de la conferencia es precisamente la aplicación de los principios cuánticos al campo electromagnético: la electrodinámica cuántica. El corrimiento Lamb y el momento anómalo del electrón, conjuntamente con el malestar por las divergencias que presenta la teoría, caracterizan el ambiente. Dos jóvenes físicos participan en la conferencia: Julian Schwinger y Richard Feynman. Un par de meses después de la conferencia estos dos talentos cambian el estado de la teoría, haciéndola según la opinión de los ffsi-

cos que trabajan en esta área la más perfecta teoría a la cual se ha llegado en la física. En el Japón Sin-Itiro Tomonaga ha trabajado durante la guerra también en la electrodinámica cuántica pero sus resultados son desconocidos en occidente. Tomonaga y Schwinger arreglan la electrodinámica cuántica con el método denominado "renormalización".

Hemos visto que al poner una carga en el vacío la masa observable de esta carga no es su masa desnuda, sino esta más la masa de la nube de partículas virtuales a su alrededor. Si se inician los cálculos con la masa desnuda de la carga, esta masa debe ser reajustada precisamente en la magnitud de la masa de la nube para obtener la masa observable. Este proceso es la renormalización. Queda sí el detalle desagradable que el reajuste se hace con una masa infinita, que es la que da la teoría para la masa de la nube. Pero a pesar de ser una corrección con magnitudes infinitas, tiene sentido y los resultados respaldan el método. Así en cada cálculo se renormalizan masa y carga. Sidney Drell llama a esto "coexistencia pacífica con los infinitos".

Con la renormalización se consigue así la más perfecta concordancia entre teoría y experimento que se conoce en la Física o en cualquier otra ciencia. Así por ejemplo el momento magnético del electrón puede ser medido con una precisión de 2 partes en  $10^9$ , y el resultado de la medición concuerda con la teoría en 1 parte en  $10^9$ .

Muy destacada es la contribución de Richard Feynman en la electrodinámica cuántica y sobre todo tiene enormes consecuencias de elegancia y comodidad para el trabajo práctico de los físicos en esta área. Guiado por su maestro John Wheeler en Princeton, Feynman tiene la idea insólita de corregir la teoría cuántica de campos eliminando de ella el concepto de campo. Primero trabaja en una nueva formulación de la electrodinámica clásica sin campos, partiendo del integral de acción sobre líneas de universo y utilizando "potenciales retardados" que describen interacciones normales que se propagan temporalmente al futuro, pero también "potenciales avanzados" que describen interacciones que se propagan temporalmente hacia el pasado. Sobre este modelo desarrolla luego una mecánica cuántica. Resulta de esto una nueva formulación de la mecánica cuántica equivalente a la mecánica ondulatoria de SCHRODINGER o al álgebra matricial de Heisenberg. Y también resulta la electrodinámica cuántica formulada con los famosos diagramas de Feynman, hoy herramienta número uno de los físicos de partículas.

Con los diagramas de Feynman se representan los procesos de una forma simple, intuitiva y al mismo tiempo permiten el análisis y la derivación de las fórmulas matemáticas. Los diagramas de Feynman se parecen a una taquigrafía que resume los serios y largos cálculos, los organiza y los convierte en procedimientos más bien simples que siguen un conjunto de reglas fijas.

### LA TEORIA DE CAMPOS Y EL DECAIMIENTO BETA

En febrero de 1932 Chadwick descubre el neutrón, lo cual da una nueva visión sobre la composición del núcleo atómico y del decaimiento beta.

Desde el final del siglo XIX con el descubrimiento de la radioactividad por Henry Becquerel se venía observando como parte de la radioactividad la emisión de electrones. Con el descubrimiento del núcleo atómico por Ernest Rutherford en 1911 se suponía entonces que los electrones emitidos en el decaimiento beta estarían en el interior del núcleo. Madame Curie los creía en lo más profundo del núcleo. Se suponía el núcleo compuesto por protones y neutrones.

Pero ya al comenzar los años 30 hay suficiente evidencia experimental que contradice la composición nuclear por protones y electrones. Así por ejemplo los núcleos de número de masa par tienen spin entero, mientras que los núcleos de número de masa impar tienen spin semientero. Esto no se puede lograr conformando el núcleo con protones y electrones. Además los momentos magnéticos de los núcleos son muy pequeños, como para que contengan una contribución del momento magnético de electrones. Así en 1932 con el descubrimiento del neutrón se arreglan estas dificultades: una partícula de masa como la del protón pero neutral, eso es el neutrón, y el núcleo está compuesto por protones y neutrones. Pero entonces ¿dónde están los electrones emitidos en el decaimiento beta antes de ser emitidos?

En 1933 la séptima conferencia de Solvay está dedicada al núcleo y sobre todo al problemático decaimiento beta. Parece que este cuestiona nada más y nada menos que la conservación de la energía. Los electrones emitidos en el decaimiento beta tiene un espectro de energía continuo, a pesar de que el estado inicial y el estado final están perfectamente definidos con valores fijos de energía. Niels Bohr está dispuesto a

abandonar la conservación de la energía. Pero Wolfgang Pauli venía proponiendo desde 1930 la existencia de partículas neutras de masa muy pequeña o cero y de spin  $1/2$ , que acompañarían a los electrones emitidos en el decaimiento beta. Estas partículas, muy difíciles de observar, llevarían la energía y el momentum angular que faltaban en la observación experimental. Se las llama neutrinos. Pauli presenta su propuesta de neutrinos en la conferencia de Solvay.

Heisenberg en esa conferencia contribuye con otro elemento para completar el cuadro del decaimiento beta: Desde junio de 1932 Heisenberg entiende el núcleo compuesto solo por nucleones, los cuales pueden encontrarse en dos estados posibles, el estado protón o el estado neutrón. Esto se describe con el spin Isotópico. Según Heisenberg es posible una transición del estado neutrón al estado protón con emisión de un electrón. Así el electrón no está en el núcleo antes del cambio de estado del nucleón, sino que es formado al tener lugar la transición. Es lo análogo a la emisión de un fotón en una transición atómica. También es posible la transición del estado protón al estado neutrón con absorción de un electrón. Estos procesos de emisión y absorción de electrones llevan a fuerzas entre los nucleones, lo mismo que los procesos de emisión y absorción de fotones llevan a fuerzas de Coulomb.

Enrico Fermi participa en la conferencia de Solvay y tiene así todos los elementos en sus manos para proceder a desarrollar la teoría del decaimiento beta, lo cual hace con impresionante rapidez, ya en diciembre de 1933 está lista y la publica en 1934. Utiliza la teoría de campos, el formalismo de segunda cuantificación le proporciona los operadores para la creación o aniquilación de electrones y neutrinos. Aplicando su teoría calcula la forma del espectro de energía del decaimiento beta y establece un criterio para la muy pequeña masa del neutrino.

Esta teoría del decaimiento beta se extiende luego a otros procesos de decaimiento, empezando por los piones. Se trata de todos los decaimientos mediados por la interacción fundamental débil. Con los años estudiando esta interacción los físicos se llevan ciertas sorpresas, como el descubrimiento en 1957 de la violación de la paridad por la interacción débil, lo que lleva a una reformulación de la teoría por Feynman y Gell-Mann, Sudarshan y Marshak. Luego en 1962 N. Cabibbo extiende la teoría para incluir procesos de interacción débil donde cambia la extrañeza, una de las varias propiedades de las nuevas partículas que día a día van descubriendo los físicos de altas energías.

## LA TEORIA DE YUKAWA

Con la evidencia experimental reunida por la época de la séptima conferencia de Solvay y los desarrollos teóricos hasta la teoría del decaimiento beta de Fermi en 1934, un joven japonés, Hideki Yukawa, estudia la interacción entre los nucleones en el núcleo. Piensa que la transición del estado protón al estado neutrón no siempre va acompañada de la emisión de un electrón y un neutrino. Podría ser que la energía liberada en la transición la puede tomar otro nucleón pasando del estado neutrón al estado protón, quedando igual el número de protones y neutrones en el núcleo. Esta sería la interacción entre los nucleos que mantiene fuertemente ligados a los componentes del núcleo con una atracción muy superior a la repulsión de Coulomb entre los protones. Hay entonces un campo de fuerza fuerte, que al cuantificarlo lleva a un cuanto masivo. Aplicando el principio de incertidumbre de Heisenberg y la relación de Einstein para masa y energía Yukawa calcula la masa del cuanto de la fuerza fuerte: aproximadamente 200 veces la masa del electrón. Esto fue publicado por Yukawa en 1935. Esta partícula, el cuanto del campo fuerte es el mesón  $-\pi$  o pión y debe aparecer en tres formas: neutral, positiva o negativa, siendo la magnitud de la carga igual a la del protón.

Yukawa se hace famoso, pues en 1937 estudiando las radiaciones cósmicas Carl Anderson y su colaborador S.H. Neddermeyer descubren una partícula de masa cercana a 200 veces la masa del electrón. Se la considera apresuradamente como la partícula de Yukawa, sin embargo más adelante se observa que el comportamiento de estas partículas no más adelante se observa que el comportamiento de estas partículas no concuerda con el esperado para las partículas de Yukawa que deberían interaccionar fuertemente con el núcleo. Más bien las partículas descubiertas se comportan como electrones, solo que de mayor masa. Efectivamente se había descubierto el hermano pesado del electrón: el muón. Tan solo 10 años más tarde, en 1947, se identifica a las verdaderas partículas de Yukawa: los piones.

## CROMODINAMICA CUANTICA

Con el trabajo de Yukawa se inicia el desarrollo de una teoría cuántica de campo para la fuerza nuclear fuerte. Sin embargo con la evolución de la física de partículas al iniciarse la década de los años 70, se

reconoce la existencia de los quarks como constituyentes de los nucleones y de todas las partículas que interaccionan fuertemente (hadrones). Se desarrolla entonces en forma análoga a la electrodinámica cuántica la cromodinámica cuántica para la interacción entre quarks, la interacción fuerte. El cuanto masivo del campo es aquí el gluón.

## BIBLIOGRAFIA

- E. Schrödinger, *Annalen der Physik* 79 (1926), 361.
- E. Schrödinger, *Annalen der Physik* 80 (1926), 437.
- E. Schrödinger, *Annalen der Physik* 81 (1926), 109.
- R. Courant-D. Hilbert. *Methoden der Mathematischen Physik* (1924), Göttingen. 2a. edición (1930). - 3a. edición (1967) Springer Verlag - Heidelberger Taschenbücher Band 30. - Versiones en inglés: John Wiley - Interscience, New York, (1953) y (1962).
- M. Born, *Zeitschrift für Physik* 37 (1926), 863.
- M. Born, *Zeitschrift für Physik* 38 (1926), 803.
- M.G. Doncel, "La Física de Altas Energías: Partículas, Campos, Simetrías". *Historia de la Ciencia - Vol. 4*. Editorial Planeta, Barcelona (1982).
- J. Gribbin, "En busca del gato de Schrödinger". *Biblioteca Científica Salvat*. Vol. 20, Barcelona (1986).
- B. Hofmann, "The Starge Story of the Quantum", Dover Publications Inc. (1947).
- F. Hund, "Geschichte der Quantentheorie". "Bibliographisches Institut, Mannheim, (1984).
- M. Jammer "The Conceptual Development of Quantum Mechanics" (1966).
- M. Jammer "The Philosophy of Quantum Mechanics" (1974).
- J. Mehra & H. Recenberg, "The historical Development of Quantum Theory Vol. 1-1-5, Springer Verlag.
- H.R. Pagels, "The Cosmic Code: Quantum Physics as the Language of Nature", Bantam Books, New York (1982).
- E. Segre, "From X-Rays to Quarks", W.H. Freeman and Co., San Francisco (1980).
- J. S. Treffil "De los Atomos a los Quarks". "Biblioteca Científica Salvat Vol. 8, Barcelona, (1985).
- V.F. Weisskopf, *Physics Today* 34 (1981), 69.

TEORIA CUANTICA  
ALGUNAS CONSECUENCIAS FILOSOFICAS,  
CIENTIFICAS Y TECNOLOGICAS

CICLO DE CONFERENCIAS EN  
EL CENTENARIO DE

ERWIN SCHRÖDINGER  
1887 - 1963

4

*JOSE LUIS VILLAVECES C. Miembro Correspondiente de la  
Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales,  
Grupo de Química Teórica Departamento de Química Universi-  
dad Nacional de Colombia, Bogotá, D.E. - Colombia.*

## EL INFLUJO DE LA OBRA DE ERWIN SCHRÖDINGER SOBRE LA QUIMICA DEL SIGLO XX

4

JOSE LUIS VILLAVECES C.

Una conferencia acerca del influjo de la obra de ERWIN SCHRÖDINGER sobre la química del siglo XX debe comenzar por el reconocimiento de que él no hizo contribuciones directas a la química; no obstante lo cual, las consecuencias de su mecánica ondulatoria transformaron enteramente el pensamiento químico y lo colocaron sobre bases exactas, dando una explicación coherente a conceptos tan fundamentales de esta ciencia como la periodicidad de los elementos y la estabilidad de los enlaces químicos.

Presentar en detalle esta influencia llevaría un tiempo muy superior al que aquí puedo utilizar, pues sería casi una exposición entera del estado actual de las teorías químicas, por lo cual me limitaré a exponer, sucintamente, cómo la mecánica ondulatoria ofreció, por primera vez en la historia, una explicación coherente y unitaria del enlace químico. Para ello, comenzaré por exponer cuál era la situación de la explicación atomista de la química al terminar el siglo XIX.

### EL ATOMISMO AL FINAL DEL SIGLO XIX

La hipótesis de la constitución atómica de la materia había alcanzado grandes triunfos durante el siglo XIX. La teoría cinética de los gases era uno de los más importantes. La explicación de la viscosidad y otros

fenómenos de transporte y luego la del Movimiento Browniano en 1905 fueron decisivos para su aceptación.

Pero todos estos triunfos en el campo de la física eran superados por el papel jugado por la hipótesis atómica en la química, ciencia que recibía prácticamente todo su apoyo teórico de ella. Las leyes ponderales, en las cuales se basaban la estequiometría y el análisis cuantitativo, habían dado sentido a la idea atómica al comenzar el siglo. La hipótesis de Prout y la tabla periódica sugerían con fuerza la idea de una estructura interna del átomo. Las leyes de Faraday para la electroquímica confirmaban la discontinuidad de la materia y dejaban intuir la de la electricidad. La ley de Arrhenius, enunciada en 1887, hace exactamente un siglo, confirmaba claramente la posibilidad de modificar internamente la constitución de los átomos, al menos en lo que a carga eléctrica se refería.

“El estudio de las sustancias salinas avanzó enormemente gracias a la teoría electrolítica de la disociación de Arrhenius que aclaró nuestras ideas acerca de las soluciones. Esta teoría, resistió en los años posteriores el embate de muchas críticas y fue reconocida al terminar el siglo como exacta en todo lo esencial. Así, los químicos de 1900 estaban convencidos de que, en solución acuosa diluida, la sal se separa en dos partes distintas, una de las cuales tiene una carga negativa y la otra una positiva iguales a un múltiplo entero y pequeño de la carga del electrón” (Lewis, 1923).

El mismo descubrimiento del electrón hecho por J.J. Thomson al final del siglo, confirmó plenamente la posibilidad de descomponer el átomo en partículas cargadas más fundamentales, y replanteó el interrogante acerca de la estructura interna de los átomos, ahora ya con certitud sobre la naturaleza de uno de sus constituyentes.

## EL ENLACE QUIMICO

Pero, la existencia de los átomos lleva inmediatamente a plantear la pregunta de cómo y por qué se unen.

Inspirado por los estudios de Davy sobre la producción de corriente eléctrica por contacto entre sustancias distintas. Berzelius propuso en su “Essai sur la théorie de proportions chimiques et sur e’influence chimique de l’électricité” publicado en 1819, que los átomos de distintas

substancias adquieren cargas eléctricas y que la atracción entre ellas produce el enlace químico. Esta teoría, que recibió apoyo evidente de los resultados de Faraday y de Arrhenius tuvo una influencia considerable, pero se enfrentó a dificultades insuperables al tratar de explicar las uniones en la química orgánica y fue derrotada frente a los resultados de Cannizaro, que organizó la química al postular la existencia de moléculas diatómicas de los elementos, tales como  $H_2$ ,  $O_2$ , etc. Para explicar las moléculas orgánicas se usó el concepto de valencia que, en sus comienzos no fue más que una expresión de la ley de las proporciones múltiples, pero que al pasar el tiempo y, sobre todo con el desarrollo de la química orgánica estructural después de los trabajos de Van t’Hoff y Kekule, fue adquiriendo realidad física y convirtiéndose en un “algo que liga átomo y átomo” (Lewis, 1923).

El descubrimiento del electrón revivió la teoría electroquímica, pero sin desplazar por ello a las ideas basadas en la noción de estructura y valencia. Más bien se logró una situación de convivencia pacífica y, tres años antes de la mecánica ondulatoria, Lewis escribía: “Hay obviamente una gran brecha entre dos tipos extremos (de unión química): por un lado una substancia entremadamente ‘polar’, como el cloruro de sodio en la cual presumiblemente hay en todo momento un considerable desplazamiento de electricidad del sodio al cloro, y que a veces se disocia completamente en iones sodio y cloruro. Por otra parte, una substancia relativamente no polar, como el hidrógeno diatómico, que no muestra ninguna razón a priori, ni ninguna evidencia de tal desplazamiento eléctrico. ¿Debemos concluir que hay dos clases distintas de unión química una de tipo completamente polar y otra de tipo completamente no polar, y que una substancia con propiedades intermedias es meramente una mezcla de moléculas polares y no polares? O, ¿podemos encontrar algún medio de asignar todos los diversos tipos de unión química a una sola causa fundamental, que difiere sólo en la naturaleza y grado de sus manifestaciones?” (Lewis, 1923 pág. 21).

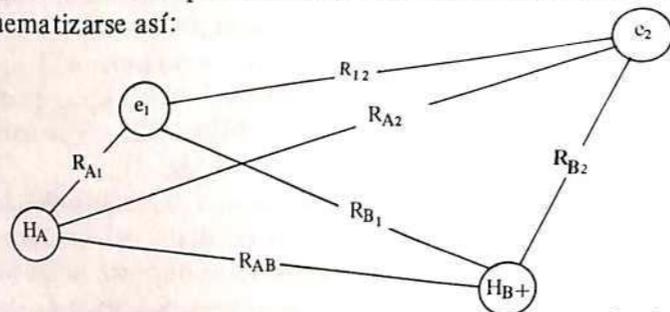
Esta situación, en la cual dos explicaciones distintas y no coherentes dan cuenta de hechos muy relacionados resultaba desagradable a Lewis ya en 1923, a pesar de lo cual nuestros libros de texto de química continúan reproduciéndola al hablar de dos tipos de enlace químico diferente: el covalente y e iónico. Una de las grandes consecuencias del trabajo de ERWIN SCHRODINGER sobre la química fue el haber permitido la eliminación de esta dualidad y la reducción a una sola teoría simple de todos los tipos de enlace químico.

### ERWIN SCHRÖDINGER Y EL ENLACE QUIMICO: UNA EXPLICACION UNITARIA Y OTRA EXPLICACION FABULOSA

Al aparecer la nueva mecánica ondulatoria, se trató casi inmediatamente de pasar del estudio de sistemas atómicos al de sistemas moleculares mediante ella. En 1927, el año siguiente al de la publicación de la serie de artículos de SCHRÖDINGER que dió nacimiento a la mecánica ondulatoria, Heitler y London aplicaron la nueva teoría al estudio de la molécula de Hidrógeno, con resultados que pueden comentarse en dos formas distintas. El primer resultado y el más importante desde el punto de vista de la química y de este centenario de ERWIN SCHRÖDINGER, fue la confirmación rotunda de que la estabilidad de la molécula o, dicho en otras palabras, el enlace químico, es perfectamente explicable en términos de cargas eléctricas. El segundo resultado, desafortunadamente el más popular, que ha dado origen a toda una colección de fábulas que llenan los textos de química del último medio siglo, se refiere a los métodos de aproximación que usaron estos dos autores para integrar la ecuación de Schrödinger. Me referiré a continuación a cada uno de ellos dos.

### ERWIN SCHRÖDINGER Y EL ENLACE QUIMICO: LA EXPLICACION UNITARIA

La molécula de Hidrógeno está formada por dos electrones y dos protones, de tal manera que el sistema de coordenadas que utilizemos puede esquematizarse así:



Usando estas coordenadas, el operador Hamiltoniano no relativista para la molécula de  $H_2$  es:

$$\mathcal{H} = -\frac{\hbar^2}{(2m)}\nabla_1^2 - \frac{\hbar^2}{(2m)}\nabla_2^2 - \frac{e^2}{R_{A1}} - \frac{e^2}{R_{B1}} - \frac{e^2}{R_{B2}} + \frac{e^2}{R_{AB}} + \frac{e^2}{R_{12}}$$

En este operador, los dos primeros términos representan respectivamente la energía cinética de los dos electrones, el tercer término es la energía potencial de atracción entre el electrón 1 y el núcleo A y los demás términos representan sucesivamente todas las posibilidades de atracción electrón-núcleo, de repulsión entre los dos núcleos y, finalmente, el último término es la energía potencial debida a la repulsión entre los dos electrones. Nótese que no hemos incluido ningún término para la energía cinética de los núcleos. Esto se debe a que estamos utilizando la aproximación conocida como de Born y Oppenheimer, quienes demostraron que, debido a que la masa de los núcleos es mucho mayor que la de los electrones, puede despreciarse, con muy buena aproximación, la energía cinética de aquellos. Esta aproximación es comunmente usada al tratar de moléculas. Quiero recalcar el hecho de que este operador nos dice que no intervienen en la molécula, a este nivel, más fuerzas que aquellas de origen puramente electrostático entre los núcleos y los electrones.

El resto del tratamiento consiste en resolver exactamente la ecuación de Schrödinger con este operador Hamiltoniano:

$$\mathcal{H}\Psi = E\Psi \quad (2)$$

para obtener las funciones de onda que representen a la molécula de hidrógeno en la teoría cuántica y a partir de la cual se puedan calcular todas sus propiedades. La solución de esta ecuación nos da en primer lugar los valores de la energía en los distintos estados en que puede encontrarse la molécula. No voy a entrar en detalles de la resolución de la ecuación. Baste decir que la primera solución exacta fue obtenida numéricamente por James y Coolidge en 1933 y que, desde entonces se han desarrollado refinamientos en las técnicas numéricas que han llevado a obtener prácticamente tantos decimales de precisión como se desee; en todo caso, muchos más de los que pueda dar la más rigurosa experimentación.

¿Qué nos dicen estas soluciones sobre la molécula de  $H_2$ ? En primer lugar, es interesante analizar las curvas de energía contra distancia internuclear,  $R_{AB}$ . Esta curva, para el estado de más baja energía tiene la forma indicada en la figura 1.

El comportamiento de la energía en función de la distancia, con su profundo mínimo para una separación internuclear de 0,74 Å, nos indi-

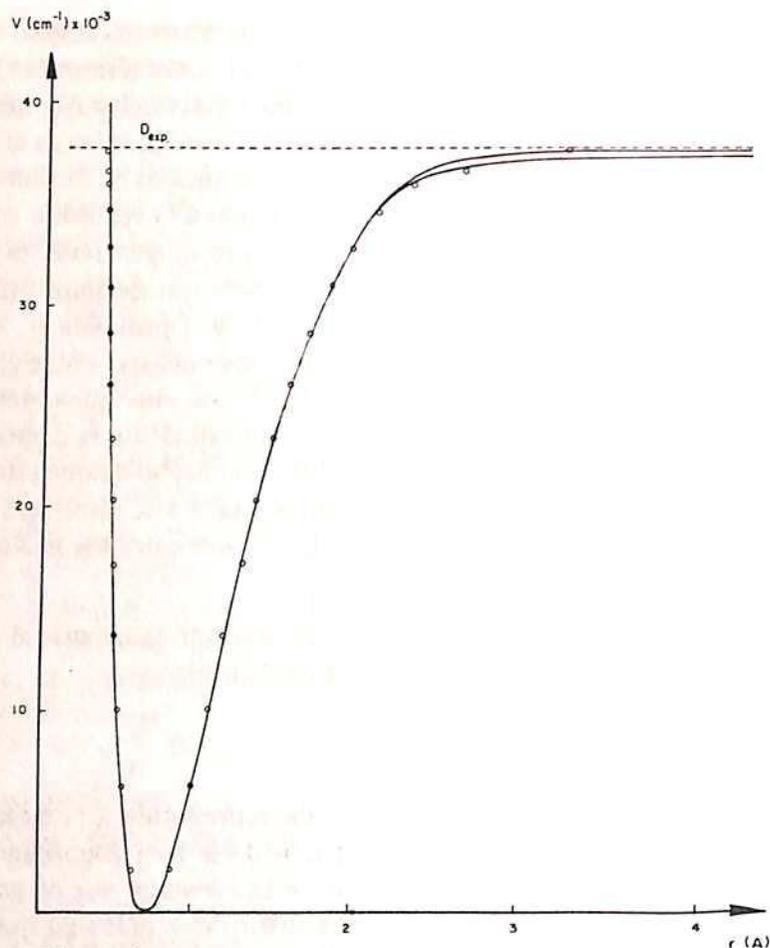


Figura 1-

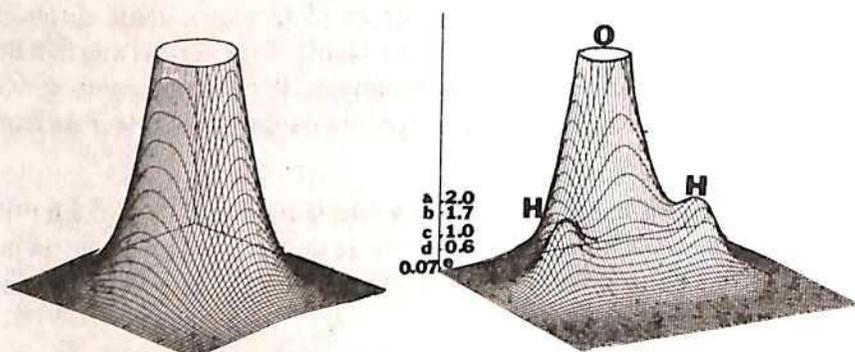


Figura 2-

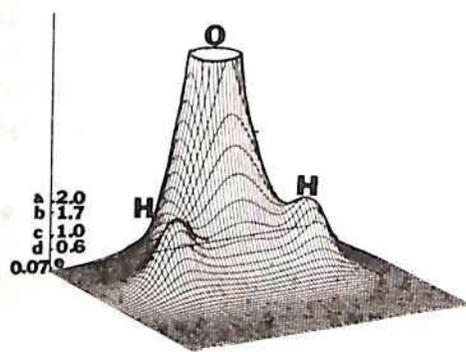
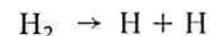


Figura 3-

ca, en primer lugar que la molécula de Hidrógeno en este estado es un sistema estable, que necesitaría de 4,75 e.v. para que los núcleos se alejen hasta el infinito, es decir, para que tenga lugar el proceso:



La teoría predice así que la molécula diatómica de  $\text{H}_2$  es estable, y tiene una energía de disociación de 4,75 e.v. Este fue en su momento un resultado fundamental. Ninguna teoría física era capaz, antes de SCHRÖDINGER, de predecir la estabilidad de este simple sistema de dos cargas positivas y dos cargas negativas. La mecánica ondulatoria explicó el enlace químico y lo explicó de una manera muy simple: Los dos átomos de hidrógeno se mantienen unidos en la molécula simplemente por las fuerzas de atracción entre las cargas de signo opuesto, que son capaces de sobreponerse a las repulsiones entre cargas del mismo signo y producir estabilidad.

En cierto sentido esto es una reivindicación de la vieja teoría electrostática de Berzelius, quien había atribuido al mismo origen el enlace químico: a la atracción entre cargas opuestas. La diferencia está en que Berzelius creyó que eran los átomos los cuerpos cargados y el tratamiento de SCHRÖDINGER asigna este papel a los electrones y núcleos. Sin embargo, fue necesario el advenimiento de la mecánica cuántica, pues la incorrecta electrostática clásica no podía hacer adecuadamente los cálculos del sistema con cuatro cargas y predecía, erróneamente, la disociación.

Las funciones de onda que resultan de la Ecuación de Schrödinger permiten no solamente conocer la energía del sistema, sino también otras propiedades. De mucho interés para la química es la densidad electrónica punto a punto, que se representa mediante mapas de densidad. Un ejemplo, para la molécula del  $\text{H}_2$  se ve en la figura 2.

Tal vez, es más interesante analizar estos mapas de densidad electrónica en un caso como el de la molécula de Agua,  $\text{H}_2\text{O}$ , para la cual la figura 3 nos muestra un mapa de densidad electrónica tridimensional.

En él es evidente que la carga eléctrica negativa no está distribuida uniformemente, sino que se concentra mucho más alrededor del oxígeno que alrededor de los hidrógenos. Esto indica la existencia de un fuerte momento dipolar en el agua que se puede calcular también a partir del conocimiento de la densidad electrónica. El llevar a cabo

estos cálculos nos lleva a la conclusión, entre otras cosas, de que el agua es líquida, lo cual no parece un descubrimiento muy trascendental. Lo que es trascendental es lograr predecir que  $10^{23}$  dipolos de estos forman a  $20^{\circ}\text{C}$  una fase condensada y fluida. Esta predicción de propiedades macroscópicas de las sustancias químicas a partir de la teoría atómica era imposible antes de SCHRÖDINGER.

Desde el trabajo de James y Coolidge en 1933 hasta mediados de la década del sesenta no se aplicó la mecánica cuántica más que al estudio de moléculas relativamente pequeñas y sencillas, debido a que la integración de la ecuación de Schrödinger requiere un trabajo numérico formidable, que sólo empezó a ser practicable con el advenimiento de los grandes computadores. En la actualidad, sin embargo, se estudian sistemas relativamente complejos. En Colombia, por ejemplo, se aplican análisis similares al que hemos esbozado, es decir, estudios de la energía de una molécula en función de su geometría y de la repartición de las densidades de carga para colaborar a entender por qué el carbón del Cerrejón no es coquizable mientras que los de Cundinamarca sí lo son, y para descubrir cómo se puede volver coquizable aquel, o para predecir mejor los determinantes antigénicos que pueden llevar a la producción de vacunas sintéticas contra la malaria. Por otro lado, además de estas aplicaciones prácticas, el haber reducido la molécula a un conjunto de cargas eléctricas cuyas propiedades son estudiables y predecibles ha permitido entender los fundamentos mismos de la ciencia química que se alista a convertirse en la ciencia exacta que D'Alembert soñó y Kant aseguró que no podía ser.

El trabajo de SCHRÖDINGER cambió la cara de la química. Tan fuerte fue el efecto de estos primeros triunfos que Dirac llegó a afirmar que la química como ciencia había desaparecido y pasado a ser un capítulo de física aplicada.

#### ERWIN SCHRÖDINGER Y EL ENLACE QUIMICO: LA EXPLICACION FABULOSA

Aunque el razonamiento que acabo de dar es estricto, y el gran aporte positivo de la obra de SCHRÖDINGER sobre nuestra concepción del enlace químico fue el haber mostrado que los átomos se unen para formar una molécula en virtud del equilibrio logrado entre las

atracciones y repulsiones debidas a las cargas de electrones y de núcleos, no es esta la explicación del enlace químico que se encuentra frecuentemente en nuestros libros de texto o en nuestros programas de bachillerato o de química general. En vez de ella, se encuentra en unos y otros un enjambre de seres mitológicos y cuentos de hadas sin mayor base científica que pueden, desafortunadamente, ser vinculados también con el trabajo de ERWIN SCHRÖDINGER, a través de la colaboración de varios divulgadores irresponsables que no supieron entender lo que decían las ecuaciones que trataron de explicar. No puedo terminar esta exposición sin comentar por lo menos brevemente, cómo se originó toda esta mitología.

Heitler y London escribieron la ecuación de Schrödinger para la molécula de Hidrógeno en 1927 y sólo seis años después, en 1933, James y Coolidge ofrecieron un resultado exacto. Esta demora se debió a que la ecuación es muy difícil de integrar debido a la presencia del término

$$e^2/R_{12}$$

en el hamiltoniano. En el denominador de este término, que corresponde a la energía potencial de repulsión entre los dos electrones, se encuentran entremezcladas las coordenadas de estas dos partículas. Esto hace que las distintas coordenadas en la ecuación diferencial no se puedan separar y que su resolución en forma analítica sea imposible hasta el presente. Es el viejo problema de "muchos cuerpos", bien conocido desde la física clásica, que se presenta siempre que hay más de dos cuerpos en interacción mutua.

Heitler y London no se detuvieron en el simple planteamiento de la ecuación, esperando que otros trajeran la solución. Ellos intentaron construir soluciones *aproximadas*, que les permitieran sobre todo ir viendo si la novísima mecánica cuántica ayudaba a entender el entonces no resuelto problema de la estabilidad de las moléculas. Para construir su solución partieron del comportamiento asintótico para distancias muy grandes de los dos núcleos. En este caso, la situación es prácticamente la de dos átomos separados y una solución posible es el producto de las funciones para los dos átomos independientes:

$$\Psi(1,2) = 1S_A(1) 1S_B(2) \quad (3)$$

donde  $1S_A(1)$  representa al electrón 1 en el átomo de hidrógeno A y  $1S_B(2)$  al electrón 2 en el átomo B. Se puede usar esta función para estudiar aproximadamente el comportamiento de la molécula a pequeñas distancias, pero es evidentemente inaceptable, pues viola el principio de indistinguibilidad de los electrones: los dos electrones serían diferentes al estar cada uno de ellos asociado con un núcleo distinto. Por esta razón trataron de usar una combinación de las dos situaciones posibles en la siguiente forma:

$$\Psi(1,2) \approx 1S_A(1) 1S_B(2) + 1S_A(2) 1S_B(1) \quad (4)$$

Utilizando esta combinación como una función aproximada, calcularon la energía en función de la distancia, y construyeron un mapa de la densidad electrónica, obteniendo resultados *cualitativamente* similares a las figuras 1 y 2, aunque pobres desde el punto de vista cuantitativo. Así, la energía de disociación resulta ser de 3,16 e.v. en vez de los 4,75 e.v. que da la experiencia y la distancia internuclear de equilibrio es de 0,80Å en vez de los 0,74Å correctos. Esto no es de extrañar, puesto que se trata de una aproximación relativamente burda. Sin embargo, el resultado tuvo una importancia histórica trascendental. A solo un año de la formulación de la mecánica ondulatoria, esta teoría permitía explicar por primera vez el enlace químico y la estabilidad de la molécula de hidrógeno y describía en forma cualitativamente correcta las propiedades de esta molécula.

La nueva teoría prometía incluir a la química. La airosa proclamación de Dirac fue hecha ante estos resultados, antes de que James y Coolidge llegaran a una solución correcta en la cual la función, mucho más complicada, tiene muy poco que ver con la primera aproximación de Heitler y London. Pero la racha de prometedores resultados produjo efectos embriagantes. Fueron varios quienes, en vez de tratar de mejorar la aproximación empezaron a tomarla como la solución correcta y a extraer interpretaciones de ella. En vez de entender que Heitler y London habían combinado los dos términos de la ecuación (4) para que su aproximación tuviera la simetría correcta, empezaron a pensar que realmente, el electrón saltaba de un "orbital" al otro al formarse el enlace químico y se empezó a hablar de las energías de "intercambio" como el origen del enlace químico. Esto se agravó, porque, al calcular el valor esperado de la energía para esta función aproximada, se obtiene la expresión

$$E = 2E_H + (H_c + H_x) / (1 + S) \quad (5)$$

donde  $E_H$  corresponde a la energía exacta de un átomo de hidrógeno independiente. La energía de la molécula, resulta así ser la de dos átomos, corregida por la fracción que aparece a continuación. En esta fracción, el primer término,  $H_c$  corresponde a la energía de repulsión electrostática entre los electrones, positiva, que aumenta la energía total. Si no existiera sino él, la molécula tendría mayor energía que los átomos aislados y sería inestable, pero el término restante,  $H_x$  corresponde a la integral

$$H_x = \int 1S_A(1) 1S_B(2) H' 1S_A(2) 1S_B(1) dv_1 dv_2 \quad (6)$$

donde  $H'$  es el operador

$$H' = -e^2/R_{A1} - e^2/R_{B2} + e^2/R_{AB} + e^2/R_{12} \quad (7)$$

La integral  $H_x$  es negativa y mayor en valor absoluto que  $H_c$ ; es por lo tanto la responsable de que la energía calculada según la ecuación (5) sea menor que la de dos átomos de Hidrógeno aislados. No corresponde a ningún observable y no tiene sentido clásico, pero era demasiado tentadora la presencia en ella de cada electrón asociado una vez con el núcleo A y otra vez con el núcleo B. Saltaron las interpretaciones. Es el "intercambio", evidente en esta integral el responsable del equilibrio químico. Como los dos orbitales eran soluciones de la ecuación de Schrödinger para el átomo de Hidrógeno, —la ecuación de onda—, estábamos ante dos ondas (¿de qué? eso no era obstáculo para las interpretaciones), y el intercambio correspondía a una "resonancia".

Así nació la "teoría" de la resonancia, que muchos libros de texto tratan como una de las teorías que sirven de base a la química. Los mismos libros que se cuidan de explicar que esto no es más que un intento de obtener una solución aproximada y sencilla a la ecuación de SCHRODINGER, ecuación esta que no introduce "híbridos de resonancia", ni "orbitales", ni "intercambio de electrones", ni ningún otro ente fabuloso, sino que, resuelta exactamente, reduce el enlace químico a la atracción de cargas opuestas.

Sin embargo, tristemente, estas "explicaciones" hicieron carrera en el medio siglo que siguió al nacimiento de la mecánica ondulatoria, y generaciones de bachilleres y universitarios han tenido que aprenderlas y recitarlas antes de poder, sabiamente, olvidarlas. Los nuevos "conceptos" se ratificaron, los orbitales adquirieron solidez, las "especies que contribuyen al híbrido de resonancia" también, en un proceso similar al que hubiera podido darse sí, al encontrarse que es matemáticamente práctico descomponer las ecuaciones del tiro parabólico en sus dos componentes vectoriales, la gente hubiera empezado a creer que cada vez que lanza una piedra, en realidad lanza dos: una que sube y baja volviendo a caer sobre su cabeza y otra que se va a raz de suelo, con velocidad constante, hasta el blanco deseado.

Este ha sido el influjo negativo que en química ha tenido la obra de SCHRODINGER. El entusiasmo incontrolado causado por los primeros éxitos, el esfuerzo de divulgar rápidamente estos resultados, y la irresponsabilidad de quienes escriben libros de texto "elementales" llevaron a que la mayor parte de la comunidad química confundiera la nueva teoría unificadora y cuantitativa del enlace químico con estos cuentos de hadas nacidos de una pobre comprensión de los métodos de aproximación.

## BIBLIOGRAFIA

- Arrhenius, (1887) *Z. Phys, Chem*, *1*, 631, La teoría de la disociación electrónica.
- Cannizaro, S., (1858), "Sunto di un Corso di filosofia chimica" Génova, Pequeño libro de texto que puede ser considerado el más importante de Química Teórica en el Siglo XIX.
- Heitler W., London F., (1927) *Z. Physik*, *44*, 455-472 El primer tratamiento de la molécula de Hidrógeno.
- James, H.M., Coolidge, A.S., (1933) *J. Chem. Phys*, *1*, 825, La primera solución exacta de la Ecuación de Schrödinger para la molécula de Hidrógeno.
- Lewis, G.N., (1923), "Valence and the Structure of Atoms and Molecules", reimpressa por Dover, 1966, El último gran libro precuántico de Química Teórica.
- Mulliken R.S. (1932) *Phys. Rev.* *41*, 49, La definición de la palabra "orbital".
- Mulliken R.S. (1935) *J. Phys, Chem*, *3*, 375 (1935) el método LCAO.

TEORIA CUANTICA  
ALGUNAS CONSECUENCIAS FILOSOFICAS,  
CIENTIFICAS Y TECNOLOGICAS

CICLO DE CONFERENCIAS EN  
EL CENTENARIO DE

ERWIN SCHRÖDINGER  
1887 - 1963

5

*PAUL BROMBERG Z. Profesor Departamento de Física Uni-  
versidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.E. - Colombia.*

## SCHRÖDINGER Y LA BIOLOGIA: EL DRAMA DE LA INTERDISCIPLINARIEDAD

---

5

*PAUL BROMBERG Z.*

### I. JUSTIFICACION

Por razones que deben quedar claras al concluir, debemos comenzar reflexionando brevemente sobre los motivos que llevan a una comunidad a ofrecer un homenaje a quien, muerto ya hace muchos años, no tiene cómo sentirse halagado. Este tipo de acto constituye, en mi opinión, una manera de profundizar la identidad de los oferentes a través de la interpretación de la obra de alguno de sus antecesores ilustres, aún cuando la actitud de algún disidente sea elegir como vía para lograrlo el abordar temas que al interior de la comunidad generan controversia.

Cada comunidad reflejará en su interpretación sus propios puntos en común. Con SCHRÖDINGER, los vieneses rendirán homenaje al vienés, los irlandeses al investigador que halló refugio contra la barbarie y ambiente estimulante en el Instituto de Estudios Avanzados de Dublín, sus descendientes al padre y abuelo que llevó el apellido al reconocimiento universal. Los físicos, la comunidad que con más razón reclama a SCHRÖDINGER como su miembro, recalcarán la trascendencia del científico para toda la humanidad, exagerando donde crean sensato hacerlo y resaltando, dicho sea de paso, los méritos del trabajo de sus continuadores.

Luego, si los físicos incluyen en este homenaje un análisis de la importancia de la obra de SCHRÖDINGER para la biología debe existir la intención a afianzar algún elemento de su identidad —lo que precisamente me interesa escudriñar en este trabajo—, que en este caso estaría relacionado con el enfoque que hace desde su particular disciplina de los fenómenos vitales. En efecto, a partir del momento en que su interpretación del mundo se distinguió de la filosofía natural bajo la idea de que todo es dable de ser interpretado como un cuerpo de masa  $m$  sujeto a la acción de fuerzas reguladas por leyes definidas, el físico es parte activa en una polémica que adquirió relevancia por el éxito de su interpretación. Describo la cuestión así: “Bien. Todo cuerpo es un cuerpo de masa  $m$  sujeto a la acción de fuerzas, pero, ¿no hay algo más en los seres vivos?”

Se estableció entonces una división en el origen mismo de la ciencia moderna, a cada lado de la cual los polemizantes han pugnado por correr o borrar una difusa línea de demarcación que señalaría los límites de validez de métodos y resultados. Los bandos en pugna, según veremos, no están identificados tanto por la profesión<sup>2</sup>, aunque ésta influye de manera importante, como por criterios epistemológicos. Así se explica que los biólogos moleculares rindan homenaje al físico Delbrück, pero en los homenajes al físico SCHRÖDINGER se sientan obligados, sin quererlo según afirman, a participar como saboteadores<sup>3</sup>. Se explica también como algunos biólogos modernos sean más radicales que los físicos en pregonar un pretendido triunfo total de la reducción fisicoquímica de los fenómenos vitales.

Tanto por el éxito de su ecuación para describir el comportamiento de los electrones —y los seres vivos tienen de estos mucho más de los que el físico quisiera<sup>4</sup>— como por haber escrito el librito de divulgación *¿Qué es la vida?*, SCHRÖDINGER ha sido llamado a comparecer a juicio ante el tribunal de la historia acerca de su aporte al pensamiento biológico. ¿Son estas dos fuentes de eventuales aportes una y la misma cosa? Para algunos, sí; para mí, no. Y según intento mostrar, las sentencias en el juicio han estado severamente determinadas por posiciones respecto de esa difusa demarcación entre dos disciplinas como la física y la biología, más conflictiva que ninguna otra entre ramas de la ciencia, y altamente sensible a las ideologías de la ciencia moderna.

## ¿QUE ES LA VIDA?

Por ser el centro de lo que se ha convertido en una disputa, se hace inevitable una lectura del librito de SCHRÖDINGER *¿Qué es la vida?*, primera edición de 1944, es la versión escrita de un ciclo de conferencias dictado por SCHRÖDINGER en febrero de 1943, ante un auditorio no especializado en Dublín. Ha tenido una sucesión notable de reediciones desde ese entonces<sup>5</sup>. Llama la atención para nuestro interés su continua reimpresión durante los años que fueron escenario de las investigaciones que condujeron a los primeros grandes éxitos de la posteriormente llamada biología molecular.

La argumentación de SCHRÖDINGER comienza con la caracterización de las leyes físicas:

“Todas las leyes físicas y químicas que desempeñan un papel importante en la vida de los organismos son de tipo estadístico”(22)<sup>6</sup>.

Se refiere, sin decirlo abiertamente, a los valores que toman las magnitudes físicas en el marco de la termodinámica: concentraciones, presiones, diferencias de potencial. . . Un comportamiento fisiológico determinista como el del organismo vivo requiere que éste esté compuesto por un número suficientemente grande de partículas, de manera que no lo afecten profundamente las fluctuaciones, cuya importancia disminuye con  $1/\sqrt{n}$ .

Con varios ejemplos, SCHRÖDINGER resalta la justeza de este punto de vista, convenciéndonos: la estructura multiatómica de los seres vivos les faculta para defenderse de las fluctuaciones, de manera que puedan actuar determinísticamente, condición necesaria para actuar como lo hacen. Por consiguiente las leyes de la fisicoquímica tradicional, de carácter estadístico, nos bastarían.

Una vez nos ha convencido comienza su capítulo dos así:

“La suposición del físico clásico, lejos de ser trivial, es errónea”.(34)

Nueva evidencia experimental, proveniente de la genética, muestra efectivamente que la suposición es errónea: no todos los procesos biológicos involucran cantidades grandes de moléculas de exactamente la misma especie;

“Grupos increíblemente pequeños de átomos, excesivamente reducidos, desempeñarían un papel dominante en los ordenados y metódicos acontecimientos que tienen lugar dentro de un organismo vivo”(35)

Se refiere al papel jugado por un trocito de sustancia, los cromosomas (cuyas características químicas no habían sido totalmente dilucidadas en ese momento).

Destaca SCHRÖDINGER dos características físicas del “sustrato material del gen”, o sea, de los cromosomas:

1. Su tamaño, que de acuerdo con observaciones al microscopio y otras evidencias experimentales, antes del trabajo de Delbrück ya estaba limitado como máximo a un cubito de 100 Å de arista.
2. Su permanencia, generación tras generación.

SCHRÖDINGER retoma los trabajos clásicos de De Vries, realizados en 1902. Los cambios heredables de los fenotipos muestran cierta discontinuidad, en el sentido de la no existencia de formas intermedias:

“Al físico le recuerda la teoría cuántica, según la cual no hay energías intermedias entre dos niveles energéticos contiguos. Podríamos llamar la teoría de la mutación, de forma figurada, la teoría cuántica de la biología. . . Veremos que tal denominación es mucho más que figurativa. . . Las mutaciones se deben, de hecho, a saltos cuánticos en las moléculas del gen. Pero la teoría cuántica sólo tenía dos años cuando De Vries publicó su teoría de la mutación, en el año 1902. No es pues extraño que se necesitase una generación más para descubrir la íntima relación entre ambas (52).

No se trata para SCHRÖDINGER tan sólo de una analogía, o sea, de interpretar el “salto” en los cambios heredables en el fenotipo “a la manera” del salto cuántico. Se puede sospechar que la sustancia de la herencia, responsable de esos cambios en el fenotipo, sufra cambios discontinuos.

La relación entre esta discontinuidad en las mutaciones y eventuales saltos cuánticos en la sustancia responsable de la herencia fue sugerida por Timofeev, Zimmer (biólogos) y Max Delbrück en un trabajo conjunto publicado en 1935. Timofeev había venido trabajando sobre mutaciones en *Drosophila* inducidas por Rayos X, publicando en 1934 dos leyes empíricas que sugiere a Delbrück interpretar como resultado de interacción electromagnética con moléculas.

SCHRÖDINGER sigue aquí a la letra, según nos dice, los razonamientos de Delbrück. Este reduce el número de átomos que componen un gen a 1000 átomos. SCHRÖDINGER, o mejor, Delbrück, busca en la teoría cuántica del enlace químico la explicación de los dos aspectos notables, estabilidad y discontinuidad. La estabilidad le sugeriría, aún al físico antiguo de comienzos de siglo, que “esas estructuras materiales no pueden ser otra cosa que moléculas”(69), aunque el físico de aquel entonces tuviera una noción muy poco clara de las leyes interiores de la molécula, “un conocimiento puramente empírico”.

SCHRÖDINGER pasa entonces a presentar una visión simplificada de los aportes que hace la mecánica cuántica. Por una parte, la superación de una imagen ingenua de la molécula. A partir de 1926-27 los trabajos de Heitler y London han permitido explicar el enlace de la molécula de hidrógeno en el marco de la recientemente creada (por Schrödinger mismo) mecánica ondulatoria. Pero por otra parte —y esto parece ser lo más importante para el autor— con el trabajo de Heitler y London.

“Parece posible señalar de manera más directa la conexión existente entre “saltos cuánticos” y mutaciones. . . La gran revelación de la teoría cuántica fue el descubrimiento de estados discretos en el libro de la Naturaleza, en un contexto en el cual todo lo que no era continuidad parecía absurdo, de acuerdo con los puntos de vista mantenidos hasta entonces”(70).

Por la estabilidad de las mutaciones no interesarían los pequeños saltos discretos que constituyen tan sólo una pequeña variación en la molécula, sino los saltos que conducen a una reorganización sustancial y estable:

“El salto cuántico que conduce a una configuración esencialmente diferente de los mismos átomos, a una molécula isomérica. . . Las transiciones de este tipo isomérico son las únicas que nos interesan para la aplicación biológica”(78).

O sea, las mutaciones —eventos discontinuos— serían resultado de cambios isoméricos en una molécula enorme y estable: esto es, un cristal. Pero la cantidad de información que debe contener esa molécula no permite que sea un sólido regular. Debe ser entonces un *cristal aperiódico*.

Vale la pena profundizar algo en el análisis desde la perspectiva actual de la imagen molecular de las mutaciones como transiciones isoméricas, pues nos da una clave del aporte de las *ideas* de la mecánica cuántica a la dilucidación del mecanismo de la herencia. Si las mutaciones se atribuyen a la superación de umbrales discretos de energía, a cambios isoméricos, entonces si la discontinuidad en las energías aportada por la mecánica cuántica no habría manera de explicar la discontinuidad en las mutaciones. Pero recordemos que no todo el libro de la naturaleza era considerado continuo para la física clásica a la cual alude SCHRÖDINGER. Podría pensarse en mutaciones –fenómenos discretos– como cambios de composición química en lugar de transiciones isoméricas (lo que a la postre resultó ser lo correcto). Luego, el salto cuántico no es requisito indispensable, ni en 1940, ni en 1900, para suponer un posible modelo de gen mutante a saltos. . . más aún si a la postre resultó que el modelo correcto no dependía directamente de los saltos cuánticos. Hasta aquí, entonces, y así mismo lo reconoce SCHRÖDINGER, el aporte de la mecánica cuántica es haber dado explicación al enlace químico.

Hasta comenzar el capítulo seis SCHRÖDINGER no ha aportado nada suyo. Aclara que a él no le interesa el detalle del mecanismo:

“No creo que de la física provenga información detallada a este respecto en un futuro cercano”(94)

El avance seguiría en manos de la bioquímica, guiada por la fisiología y la genética. Pero, prosigue, de la estructura correspondiente al modelo de Delbrück.

“Puede extraerse una sola conclusión general, y confieso que éste ha sido el único motivo por el que he escrito este libro”(94).

Por fin, luego de un recuento de cierta genética de frontera (en ese entonces), SCHRÖDINGER nos va a dar su aporte. Continúa:

“De la descripción general de Delbrück del material hereditario resulta que la materia viva, si bien no elude las “leyes de la física” tal como están establecidas hasta la fecha, probablemente implica “otras leyes física” desconocidas por ahora, las cuales, una vez descubiertas, formarán parte tan integral de esta ciencia como las anteriores. . .”(95)

¿Por qué si un gen es un cristal aperiódico tendremos problemas con las leyes usuales de la física? Para aclararnos esto SCHRÖDINGER primero nos confunde:

“El físico está familiarizado con el hecho de que las leyes clásicas de la física son modificadas por la teoría cuántica, especialmente a bajas temperaturas. . . La vida parece ser (un caso) de estos. . . El organismo vivo parece ser un sistema macroscópico cuyo comportamiento, en parte, se aproxima a la conducta puramente mecánica (en contraste con la termodinámica) a la que tienden todos los sistemas cuando la temperatura se aproxima al cero absoluto”(96).

¿Bajas temperaturas? ¿Cómo podría haber una relación entre el ser vivo y el cero absoluto?

La explicación que ofrece de este sorpresivo giro en la argumentación comienza recordándonos el carácter estadístico de las leyes usuales de la física,

“. . . y (esto tiene) mucho que ver con la tendencia natural de las cosas de ir hacia el desorden”(96).

O sea, la segunda ley de la termodinámica. SCHRÖDINGER destina unas páginas a explicar el concepto de entropía y a considerar su lugar en los fenómenos vitales. Luego de algunos ejemplos clásicos sobre la tendencia de los procesos de llevar los sistemas hacia entropías mayores, señala cómo los organismos se alimentan de entropía negativa. Mediante el metabolismo,

“el organismo consigue librarse asimismo de toda la entropía que no puede dejar de producir mientras está vivo”(98)

Con la interpretación estadística de la entropía “la burda expresión (entropía negativa)” se puede traducir en término de orden: el organismo elude la degradación absorbiendo orden de su medio ambiente. Pasa entonces a dar el puntillazo final a su argumentación.

El último capítulo vincula entre sí todas las consideraciones de los capítulos precedentes, dando respuesta a las preguntas que quedaron en el aire:

“A partir de todo lo que hemos aprendido sobre la estructura de la materia viva, debemos estar dispuestos a encontrar que funciona de una manera que no puede reducirse a las leyes ordinarias de la física. . .”(104).

¿Por qué, nuevamente? ¿Por qué las leyes ordinarias de la física no se adecúan al hecho de que “la asombrosa propiedad de un organismo de concentrar una corriente de orden. . . (esté conectada) con la presencia de sólidos aperiódicos? Porque las leyes ordinarias de la física están basadas en el “orden a partir del desorden”, esto es: los acontecimientos deterministas de las leyes “normales” de la física tienen como telón de fondo el comportamiento desordenado de un número suficientemente grande de moléculas; se trata de un comportamiento “estadístico”, “promedio”, protagonizado por un número muy grande de entidades moleculares idénticas. En cambio,

“en biología nos encontramos con una situación completamente diferente. Un único grupo de átomos (la molécula cromosómica), del que existe una sola copia, produce acontecimientos ordenadamente. . .” (107).

Se trata de un orden —en el sentido de una sucesión de eventos susceptibles de ser expresados mediante leyes deterministas— a partir del orden.

“Por tanto, no debe desanimarnos que tengamos dificultad en interpretar la vida por medio de las leyes ordinarias de la física. . . Debemos estar preparados para encontrar un nuevo tipo de ley física que la gobierne. ¿O tendremos a caso que denominarla ley no-física, o incluso superfísica?” (109).

Sin duda, una concesión que hace SCHRÖDINGER al sensacionismo. Pero, aclara a continuación, hasta cierto punto el nuevo principio de orden a partir del orden no es nuevo en la física. Y el mejor ejemplo que cita es el de un reloj. El comportamiento de un reloj, si bien no totalmente dinámico —pues a un reloj totalmente dinámico no sería necesario darle cuerda— tiene características estadísticas despreciables mientras el reloj permanezca con cuerda.

“En todo caso, queda siempre el hecho de que los “mecanismos de relojería físicos” muestran de modo visible prominentes características de “orden a partir del orden”, el tipo que motivó la excitación del físico al encontrarlo en el organismo” (112).

¿Qué tienen en común? Ese principio en común que contendrían daría cuenta del comportamiento esencial del fenómeno vital. La respuesta, sorpresivamente, está en la tercera ley de la termodinámica, o “teorema de Nernst”: el comportamiento totalmente mecánico aparece

cuando la temperatura se acerca al cero absoluto. Pero un reloj funciona como sistema mecánico casi perfecto sin que su temperatura sea siquiera cercana al cero absoluto. ¿Cómo se compaginan estas dos cosas?

Ya había Nernst notado cómo en muchas situaciones, a temperatura ambiente, la entropía juega un papel muy poco notorio. ¡Y esto se debe a que en el fenómeno participan sólidos que no cambian de estado!:

“Un mecanismo de relojería y un organismo se parecen en que la base de este último también es un sólido, el cristal aperiódico que forma la sustancia hereditaria”. (114)

Así, finalmente, se va aclarando el sorprendente giro de la argumentación que habíamos mencionado atrás. Este es el principio común: el orden a partir del orden, propio del desarrollo biológico (proceso en el cual se manifiesta el mecanismo de la herencia) se sustenta en la tercera ley de la termodinámica aplicada a un sólido, que en este caso es aperiódico. SCHRÖDINGER lo dice así: inmediatamente después de sugerir “leyes no físicas”, o “superfísica”, se retracta:

“No, no creo que tengamos que llamarla ley no física. Porque el nuevo principio subyacente es genuinamente físico. En mi opinión, no es otra cosa que el mismo principio de la mecánica cuántica”. (109)

¿Y dónde aparece la mecánica cuántica? Acaba de decir que el principio resultó ser la tercera ley de la termodinámica. Pero SCHRÖDINGER introduce la mecánica cuántica en el asunto de la siguiente manera:

“La teoría cuántica proporciona fundamento racional a la ley empírica de Nernst. permitiéndonos así mismo comprender cuánto debe acercarse un sistema al cero absoluto para exhibir un comportamiento aproximadamente dinámico” (113)

Para protegerse, debe aclarar que él no está sugiriendo “ruedas dentadas” en el interior del núcleo celular, a la manera del mecanismo del siglo XVII. No se le puede hacer esta acusación, afirma,

“al menos no sin hacer referencia a las profundas teorías físicas en las cuales se basa el símil” (114)

Esta advertencia, hecha ya terminando el libro, no puede dejar duda sobre la herramienta que emplea SCHRÖDINGER para auscultar la vida: la termodinámica.

## II. ¿DESDE QUE PUNTO DE VISTA SE JUZGA EL EVENTUAL APORTE DE SCHRÖDINGER?

Esto es, pues, lo que en su libro dice SCHRÖDINGER. En dos momentos de su argumentación se mencionan los aportes de la mecánica cuántica a la comprensión de los seres vivos: la teoría cuántica de Heitler y London para el enlace químico, y la explicación cuántica de la tercera ley de la termodinámica.

Ciertamente, sólo con la mecánica cuántica fue posible construir una teoría que explicara el enlace. Pero la mecánica cuántica no descubrió el enlace molecular. Dar cuenta de su estabilidad, modificando las leyes de las interacciones o aceptando la modificación de conceptos centrales de la física, como finalmente ocurrió, era un problema de los físicos. Estos no podían surgir de sus cubículos y laboratorios para dirigirse a los bioquímicos con una teoría que predijera la inexistencia del enlace, porque las pruebas de su existencia eran abrumadoras. Pero, desgraciadamente para el físico, tampoco podía salir con una teoría que lo predijera, porque el bioquímico le respondería que ya lo sabía.

Quedaría la función heurística de la teoría cuántica, esto es, su empleo en el descubrimiento de nuevos hechos. Entre el punto de vista de Monod (1986), "no puede predecirse o resolverse nada en química mediante la teoría cuántica, a pesar de que indiscutiblemente es el fundamento de toda la química", y el opuesto, según el cual sin la teoría cuántica estaríamos en la edad de piedra, el mismo Pauling puede estar aportando el justo medio en el que estaría la verdad: "los avances (en la explicación y caracterización del enlace químico) se han conseguido principalmente como resultado de argumentos en esencia químicos. . . La contribución principal de la mecánica cuántica a la química ha sido la sugerencia de nuevas ideas" (Pauling, 1938). Así, la contribución de la mecánica cuántica (y esto es aún más cierto respecto de las "ideas" cuánticas) para conseguir el gigantesto éxito que significó dilucidar la estructura de la molécula de ADN fue marginal. En cuanto a las ideas cuánticas, ilustra suficientemente la afirmación de Watson (1978). consultaba regularmente el libro de Pauling buscando las longitudes de los enlaces. Con esos valores. . . ¡armaba sus modelos de palitos!.

Por otra parte, al igual que en el caso del enlace molecular, de cuya realidad como dijimos ningún biólogo dudaba por más ignorante que fuese de la novísima teoría física, la mecánica cuántica contribuye

(según Schrödinger) brindando un fundamento "racional" a una ley empírica: la tercera ley de la termodinámica.

Ahora bien, ni qué decir de los aportes de SCHRÖDINGER directamente a la biología molecular, bien sea al mecanismo de replicación o a la estructura de las moléculas biológicas implicadas. SCHRÖDINGER mismo nos advierte cómo su razonamiento no intentaba contribuir a dilucidar el mecanismo de replicación —y por lo tanto, la ausencia de contribuciones en este sentido no puede sustentar el anti-homenaje en que algunos han convertido la efemérides—. No le interesaba, quizás, porque esa no era su profesión.

"El avance prosigue y continuará, estoy seguro, a partir de la bioquímica, bajos las directrices de la fisiología y la genética", en colaboración, no podía saberlo en ese momento, con unos cuantos físicos onversos, unos pocos de los cuales fueron estimulados por la lectura de su libro<sup>7</sup>. Pero recordemos que según él, de su descripción tan general nada parecido a un mecanismo puede deducirse. "El único motivo por el que (ha) escrito (el) libro tiene que ver con una conclusión general que *extrañamente* (palabras de SCHRÖDINGER, subrayado mío) puede extraerse del razonamiento" hecho a lo largo del libro.

¿Qué conclusiones pueden parecer extrañas a mediados del siglo XX? Ya en ese entonces el físico cruzaba sin objeción de los biólogos la línea de demarcación llevando sus instrumentos y su manual para interpretar sus datos, o sea, su teoría, con el fin de hacer la geometría de las moléculas. Nadie en ese entonces —mucho menos ahora— objetaría una afirmación como

"Los seres vivos están integrados por moléculas inanimadas. Cuando se examinan individualmente, estas moléculas se ajustan a todas las leyes físicas y químicas que rigen el comportamiento de la materia inerte" (Lehninger, 1980).

No puede causar extrañeza en el siglo XX, repito, esta manera de cruzar la línea. Pero no es posible pasar por alto que se trata del perfeccionamiento de una vieja idea, por más distancia que medie entre los detalles actuales y los corpúsculos pequeños, lisos y redondos que según el poema de Lucrecio componen el alma<sup>8</sup>. La propuesta de Lucrecio renació en el siglo XVII como consecuencia del éxito de Galileo, Newton y sucesores en el estudio de algunos fenómenos naturales, encarnada en la esperanza de una corriente de pensadores que propone explicarlo todo —incluida la vida— en términos de fuerzas entre partículas.

La interpretación medieval de los fenómenos naturales está tan impregnada de causas finales que se habla de ella como biologización de la naturaleza (C.U.M. Smith, 1977). La física que se origina en Galileo y Newton rechaza estos criterios de explicación, y establece un programa de investigación que busca otro tipo de respuestas a preguntas formuladas de otra manera:

“Tras la constitución de una física, a comienzos del siglo XVII, el estudio de los seres vivos se encontró situado frente a una contradicción. A partir de entonces la oposición no ha hecho más que crecer entre, por un lado, la interpretación mecanicista del organismo, y por otro, la evidente finalidad de ciertos fenómenos como el desarrollo de un huevo hasta convertirse en adulto, o el comportamiento de un animal” (Jacob, 1986).

Dónde estaba para cada quien, en los períodos inmediatamente posteriores a la revolución científica, la línea demarcatoria, importa menos aquí que el hecho mismo de la división que se estableció. Vemos cómo la explicación en términos de la causa eficiente y la reducción de los fenómenos a interacción entre las partículas que componen los cuerpos participantes se presentan como dos caras de la misma moneda<sup>9</sup>; el énfasis en la última implica el privilegio de ciertas opciones metodológicas.

No todos están de acuerdo con la propuesta mecanicista. Maupertuis, entre otros, protesta:

“Nadie explicará nunca la formación de un cuerpo organizado solamente a base de las propiedades físicas de la materia”. . . “Una atracción uniforme y ciega, difundida por toda la materia, no podría servir para explicar cómo han llegado esas partículas incluso a formar el cuerpo más simple”<sup>10</sup>.

No solamente protesta por este proyecto reduccionista. También sugiere algo más que la ciega causa eficiente para analizar toda la naturaleza. No es tan simple como regresar a la causa final de la edad media. Recordemos que aún en la mecánica,

“el argumento de la causa final es bien aparente en la física del siglo XVIII, oscureciendo en parte a la causa “eficiente” o física en hombres como Euler, Fermat o Maupertuis. . .” (D’Arcy Thomson, 1967).

La interpretación según la cual la historia de la ciencia es la narración de cómo la causa eficiente, en nombre de la verdad y la razón arrolla la metafísica oscurantista de las causas finales enseña su flaqueza si no se hace una lectura de los motivos que tuvieron los grandes innovadores desde los libros de texto actuales —o sea, desde la ideología de la ciencia con la cual se escriben—. Afirmaciones como la de Maupertuis que transcribimos a continuación patentizan cómo se trata de la contraposición de dos metafísicas, además ambas de fuertes connotaciones teológicas:

“Conozco la repugnancia que muchos matemáticos tienen por las causas finales, aplicadas a la física. . . (pero) no se puede dudar que todas las cosas están regladas por un Ser Supremo que, mientras ha impuesto a la materia fuerzas que denotan su poder, la ha destinado a ejecutar efectos que denotan su sabiduría. . . Una mecánica ciega y necesaria sigue los designios de la Inteligencia más ilustrada. . . Para unir la extensión a la seguridad en nuestras investigaciones es necesario emplear uno y otro de estos medios. Calculemos los movimientos de los cuerpos, pero consultemos también los designios de la inteligencia que los hace mover”. (Maupertuis, 1985).

En todo caso, si rastreamos en la historia posterior a la revolución científica este conflicto limítrofe hallaremos no un avasallamiento sino una interacción fecunda en sugerencias, generalizaciones y particularizaciones, desconfianzas y deseos contrapuestos de identidad y diversidad. De todo ello parece entreverse cómo, efectivamente, la existencia de la vida misma es menos un problema para el biólogo, quien más fácilmente la acepta como un hecho dado, que para el físico, siempre enfrentado por su estilo a determinar hasta dónde extender la validez de sus leyes y conceptos generales, a los que ha llegado por algo mucho más complejo que la simple inducción.<sup>11</sup>

El conflicto se desenvuelve, desarrollándose y enriqueciéndose sin resolverse totalmente, hasta la época actual. La crítica que con razón (en su época) hacía Maupertuis al reduccionamiento se ha desvirtuado por los avances de la física —la mecánica cuántica en el papel protagónico—. Esta demuestra que una casi infinita diversidad de propiedades moleculares no se contradice con su origen en una o dos formas sencillas de interacción entre partículas. Se reencaucha el ingenuo proyecto del mecanismo, llevado rápidamente en el siglo XVIII a un callejón sin salida cuando se agotaron los fenómenos en los que cabía una analogía fácil entre el ser vivo y las máquinas de la época”.

Ahora las partículas íntimas de cada substancia no son simples pelotitas que actúan por choques entre sí; son estructuras eléctricas que pueden hacer maravillas. De una reacción que involucra proteínas, esos modernos "milagros sin licencia", tiende a esperarse casi cualquier cosa.

Por el otro lado, la teleología, "esa mujer de la que el biólogo no puede prescindir, pero en cuya compañía no quiere ser visto en público" (Jacob, 1986), ha conseguido su estatuto legal. Darwin da inicio a la biología científica con una explicación de la aparente perfección de la naturaleza que no requiere de causas finales: azar, lucha por la supervivencia (o mejor, por la reproducción), sistema explicativo que también daría cuenta de la adecuación del órgano a su función, de la estructura de la enzima a la reacción que cataliza<sup>12</sup>. Una visión estática de las especies dejaría muchas cosas sin explicar. El programa codificado en el ADN es una etapa de un proceso cuyo fin es imprevisible. De la historia de la especie emerge el ADN del individuo; éste explica a su vez la embriogénesis del individuo.

Entelequias y causas finales han desaparecido, sustituidas por la geometría molecular y la causa eficiente. La biología, ahora sí, mientras no abandone este paradigma explicativo, es una ciencia:

"La piedra angular del método científico es el postulado de la objetividad de la naturaleza. Es decir, la negativa sistemática de considerar capaz de conducir a un conocimiento (verdadero) toda interpretación de los fenómenos dada en términos de causas finales, es decir, de (proyecto). (Monod, 1986)<sup>13</sup>.

De hecho, no todos aceptarían sin más este enfoque. Por una parte, sin pretender negar los logros de la biología molecular, conviene advertir que en pocas moléculas biológicas se ha alcanzado un éxito semejante al de la molécula de ADN, en la cual la estructura sugirió inmediatamente su relación con la función (tanto que bien puede afirmarse que fue al contrario).

Por otro lado, si bien la comprobación de que los componentes últimos de los seres vivos son moléculas inertes conduce a algunos físicos a emplear sus técnicas como biólogos moleculares en búsqueda de los principios de la vida, la misma afirmación lleva a otros en el sentido contrario, con la idea de que las propiedades vitales deben ser una manifestación supramolecular. Y aquí estamos en el campo de acción de la termodinámica, o de la termodinámica estadística.

Apenas resuelto el problema de la fuente del calor animal, y unificada la naturaleza con la primera ley de la termodinámica, el físico amenaza de nuevo con romperla: otra vez parece que los fenómenos en la naturaleza tienen una causa final, como si manifestaran intencionalidad: "No pueden existir procesos cuyo estado final sea un estado menos llamativo para la naturaleza que el estado inicial<sup>14</sup>". (Max Planck).

Los principios físicos en términos de finalidad, que como vimos nunca habían abandonado la física, cobran renovada importancia con la segunda ley de la termodinámica. Pero, lo que es más grave, la naturaleza "proyectiva" que descubre el físico parece contrapuesta a la evolución y desarrollo de los seres vivos. Otra vez, el físico se auto-acusa de división culpable, y asume como propio el deber de resolver la oposición.

Podrían calificarse las afirmaciones teleológicas como la recién citada de M. Planck como paráfrasis innecesaria de fenómenos mecánicos internos, como aseveraciones aministas que oscurecerían la interpretación correcta de lo que ocurre con las moléculas. . . pues la termodinámica ya ha sido reducida a la mecánica. Ciertamente, pero a la mecánica estadística de un número grande de entidades elementales, como nos recuerda SCHRÖDINGER comenzando su libro. Se trata del comportamiento estadístico de un conjunto de partículas que sin violar las leyes de las interacciones va más allá de ellas. Es más: la ley macroscópica tiene una dinámica de conocimiento, independiente del detalle microscópico.

Es en esta línea de pensamiento donde se sitúa SCHRÖDINGER, tratando de extraer conclusiones generales sin considerar los mecanismos detallados. Conclusiones que tienen que parecer extrañas, como fueron extraños los sorprendentes resultados que obtuvo Carnot en el siglo XIX, cuando intentó extraer conclusiones generales sobre el rendimiento de cualquier máquina térmica real comparándola con una máquina ideal, una quimera. Quizás muchos de los biólogos moleculares actuales, provenientes de la física o de la biología, trasladados al siglo pasado verían a Carnot como un desenterrador de entelequias. Y así lo comprobarían cuando unos años más tarde emergiera Claustus con una entelequia, un "no sé qué" que no está contenido en las partes: la entropía.

Todo esto permite entender por qué los biólogos moleculares al mirar su libro concluyan que SCHRÖDINGER nada aportó. . . a la biología molecular. Se trata de una lectura reduccionista en la cual confunden la trama con el tema: el tema del libro no es la posteriormente llamada biología molecular; es la termodinámica de la vida.

“La intención de SCHRÖDINGER es acercar el concepto de orden termodinámico al de complejidad biológica. . . La penetrante intuición del autor en este punto no sólo ha significado un gran avance para la comprensión de los sistemas vivos, sino que ha inspirado y animado toda una nueva disciplina en física: la termodinámica de los procesos irreversibles”, afirma el editor<sup>15</sup> de la traducción española de *Qué es la vida*. Para quien ha leído el libro de SCHRÖDINGER buscando los aportes a la biología molecular el comentario del prologuista debe sorprender. ¿A qué se está refiriendo Wagensberg? No cabe aquí más que un brevísimo bosquejo.

Desde 1931, con las relaciones de reciprocidad de Onsager, se consiguiera la primera prueba de que en el campo de estudio de los sistemas fuera del equilibrio era posible llegar a nuevas leyes de un carácter tan general como las de la termodinámica del equilibrio. El paso siguiente fue el principio de mínima disipación de entropía de Prigogine, formulado en 1941: cuando las condiciones de contorno impiden al sistema alcanzar el equilibrio, éste trata de hacer las cosas “lo mejor posible”: se dirige hacia un estado de mínima producción de entropía (Prigogine, Stengers, 1983). Muchos teóricos llegaron a creer que la idea de mínima producción de entropía es el principio físico que subyace a la evolución de los fenómenos de la vida (Katchalsky, Curran, 1975). Las expectativas resultaron frustradas, pues el estado estacionario al que tienden los sistemas según esta termodinámica lineal no predice ningún tipo de formación de estructuras. Fue necesario desarrollar una termodinámica lejos del equilibrio para recuperar las expectativas. Pero lo que nos debe llamar la atención aquí no es el principio físico en sí, sino los esfuerzos de los físicos para llegar a leyes generales, válidas para un sinnúmero de sistemas fisicoquímicos diferentes. Esto ya lo había logrado la termodinámica, de una manera algo restringida: se trata de una termostática, a lo sumo de una termocuasiestática; la irreversibilidad y el desequilibrio caben en ella sólo como la negación de la reversibilidad y el equilibrio. Quedan por fuera de esa termodinámica del equilibrio, y especialmente quedan por fuera de leyes simples de lo complejo, un sinnúmero

de fenómenos, sujetos sólo a la descripción uno por uno; entre ellos, el orden biológico, la vida misma:

“Una de las muchas razones para desarrollar la termodinámica más allá del equilibrio está en la necesidad de una explicación fisicoquímica del orden biológico” (Prigogine, 1975).

Los desarrollos recientes en este campo no pretenden combatir contra los criterios de explicación biológica; intentan por lo contrario adaptarse a ellos:

“... los subsistemas que componen un sistema complejo se comportan de una manera bien organizada, de manera que el sistema total está en un estado ordenado, o *actúa como si el sistema persiguiera un propósito* (subrayado mío)” (Haken, 1975).

Así mismo, como por su carácter biológico el concepto de orden funcional en biología es extraño a la física usual, los físicos ahora intentan aproximarse a él en lugar de negarlo (Careri, 1938). Todos estos desarrollos recientes (1970 en adelante) son ejemplos de cómo el físico David Bohm no se extrañaba sin razón de que precisamente cuando la física se va apartando del mecanismo, la biología y la fisiología lo acogen sin reservas. La afirmación de J.B.S. Haldane, “si la física y la biología se encuentran algún día y una de ellas es absorbida, ésta no será la biología”<sup>16</sup> se entiende en este contexto: la inadecuación de la física a ciertos criterios de explicación biológica es una deficiencia que debe subsanar la física.

Pero la otra sorpresa contenida en la afirmación de Wagensberg la constituye el hecho de que los pioneros en el desarrollo de la termodinámica fuera del equilibrio no citan a SCHRÖDINGER. Además, el problema que aborda SCHRÖDINGER en su libro es el de la conservación del orden, no el de su surgimiento a partir del desorden.

¿Cómo puede decirse entonces que ha inspirado la nueva disciplina? No hay duda en que su contribución directa fue marginal, pues el tema lo abordó en un libro de divulgación, donde tan sólo es dable proponer ideas. Ahora, si la lectura del libro inspiró a uno u otro, eso pertenece al fuero interno de cada cual. Unos —físicos— lo leyeron como un libro de divulgación de genética y dirigieron sus intereses y capacidades a esa disciplina nueva para ellos; otros al leerlo vieron en la entropía negativa una idea útil para desarrollar y se sienten ahora obligados —quizas *a posteriori*— a citar a SCHRÖDINGER en este aspecto.

en fin: estaría fuera de tono ahora que los respectivos campos se han desarrollado precisarles que si el libro de SCHRÖDINGER los inspiró, se debió a una lectura equivocada de él.

Lo que importa aquí es cómo SCHRÖDINGER efectivamente se inscribió en la corriente de quienes han considerado que no basta afirmar que los organismos vivos no incumplen la segunda ley de la termodinámica, sino que cabe un análisis termodinámico de estos sistemas físicos-químicos especiales. Su problema particular era el hecho de que la existencia de un solo representante de una especie molecular —la molécula cromosómica— impide el análisis termodinámico de los eventos celulares que la involucran porque, por ejemplo, en ese caso no tendría sentido siquiera hablar de su concentración. Y resuelve el problema invocando la tercera ley, la mecánica cuántica y el sólido aperiódico.

En otras palabras: SCHRÖDINGER se inscribe en esa tradición de físicos a quienes en el marco del estudio de los fenómenos complejos aún sorprende el orden que manifiestan los seres vivos, esos físicos a los que alude la sentencia de Monod citada como epígrafe. Entendemos así por qué los biólogos no pensaron en organizar un homenaje paralelo al que hoy intentamos brindar. Y por qué los físicos agradecemos a SCHRÖDINGER permitirnos recordar que los físicos —o algunos de ellos— tienen sus propios problemas con la vida.

## NOTAS

1. Monod, 1986.
2. Determino en este contexto la "profesión" según las disciplinas que se estudian en los cuatro o cinco años de formación básica universitaria. Quien haya trabajado en temas interdisciplinarios aceptará que esta definición operacional no es banal. La formación recibida en este período deja una serie de normas de conducta en aspectos como pertinencia de preguntas, razonamientos plausibles, métodos de trabajo e indagación, satisfacción con ciertos criterios de explicación, etc., que sin duda acompañan al individuo toda su vida.
3. Me refiero, entre otros, al artículo de Max Perutz (1987), reseñado por Fayad (1987) en este mismo ciclo de conferencias. El término "saboteador" es exagerado, claro está. Pero Perutz hace una crítica superficial y hasta desmesurada del libro de Schrödinger. Un ejemplo: "Dado un átomo radioactivo individual, la probable longitud de su vida es mucho más incierta que la vida de un gorrión sano", dice Schrödinger en la página 107. Y comenta Perutz: "Hasta el encan-

tador contraste entre la duración promedio de la vida de un gorrión y de un átomo radiactivo estaba fuera de lugar". ¿Ha consultado libros y especialistas para concluir que los conocimientos de Schrödinger sobre la vida de las aves eran insuficientes!

4. Hay una observación de fondo en el sarcasmo de Albert Szent Györgyi: "Cuando me agregué al Instituto de Estudios Avanzados de Princeton lo hice con la esperanza de que codeándome con aquellos grandes físicos atómicos y matemáticos aprendería algo acerca de las cosas vivas. Pero en cuanto revelé que en cualquier sistema vivo hay más de dos electrones, los físicos no quisieron oír más" Citado en Bertalanffy (1976).
5. Cambridge University Press tiene reimpresiones en los años 1944, 45, 48, 51, 55, 62, 67; esto sin mencionar otras ediciones, como la de Double Day (EU) en 1956.
6. Los números entre paréntesis corresponden a la página de Schrödinger (1986).
7. Sobre este aspecto considerado en sus justas proporciones, ver Fayad (1987).
8. "El alma así, que de naturaleza / tan móvil es, debe constar de cuerpos / los más pequeños, lisos y redondos". Capítulo III, versos 280 y ss. (Lucrecio, 1969).
9. "En biología, el conflicto entre reduccionistas y anti-reduccionistas ha parecido a menudo como un conflicto entre la afirmación de una finalidad externa y la afirmación de una finalidad interna", escriben Prigogine y Stengers (1983).
10. Citado por C.U.M. Smith (1977).
11. Aunque el auge actual de la historia y la filosofía de la ciencia ha hecho disminuir su número e importancia, aún existen quienes ven en la historia de su disciplina una sucesión de errores hasta llegar a su verdad. Según éstos, fueron sus antepasados quienes cayeron en la simpleza de hacer analogías entre las máquinas de su época y los organismos vivos. Para ellos el hecho de que la herramienta teórica e instrumental moderna sea *justamente* la que necesitan para analizar ciertos fenómenos resulta ser una feliz coincidencia. En este aspecto, me limito a citar a Proigne (Prigogine, Stengers, 1983): "Damos la razón a Weiss y Waddington cuando consideran que el atribuir a las moléculas poderes de control y transmisión de información a nivel macroscópico por medio una metáfora influida por la tecnología es confundir la formulación del problema con su solución" (pág. 164) (Llama la atención cómo muchos textos de biología celular y afines considera que con decir "la célula regula" ya hay muchas cosas explicadas). Para quienes aceptan que las verdades actuales son los errores del futuro, la coincidencia desaparece: cada generación intenta resolver los problemas que su época le plantea con los instrumentos de que dispone.
12. "Si ustedes me preguntan por mi convicción más íntima sobre si nuestra época se conocerá como siglo del acero, o siglo de la electricidad, o del vapor, les contestaré sin dudar que será llamado el siglo de la visión *mecánica* de la natu-

raleza, el siglo de Darwin". Esta afirmación cobra la mayor importancia por el autor de quien proviene: Ludwig Boltzmann (1985).

13. Sobre este "postulado de objetividad" se ha centrado una porción importante de la crítica al libro *El azar y la necesidad*. El problema está en cuáles afirmaciones teleológicas son pecado para la ciencia, pues evidentemente no pueden serlo todas. "Es probable que en biología cada proceso, epigenético u homeostático, sea susceptible igualmente (como en mecánica, con la ecuación de Hamilton y el principio de mínima acción) de una doble interpretación, determinista y finalista" (René Thom, en Waddington y otros, 1976). En los diálogos que tuvieron lugar al concluir su ponencia en la Conferencia "Problemas de la raducción en biología" en 1972 (Ayala, Dobzhansky, 1983) Monod no responde claramente a Saapere, quien señala que las afirmaciones teleológicas que Monod cita a manera de ejemplo de la acción purificadora del postulado de objetividad resulten ser bastante inocentes. Para salvar su postulado de objetividad, además, Monod debe sostener —sorprendentemente— que las afirmaciones sobre función no son de carácter teleológico. Son abrumadores en cantidad y argumento los pronunciamientos en sentido contrario (Wright, 1979; Ruse, 1979). Cito tan sólo a Ayala (1968): "La explicación teleológica es aquella en la cual la presencia de un objeto o un proceso en un sistema es explicada mostrándolo en conexión con un estado o propiedad del sistema para cuya existencia o permanencia el objeto o proceso contribuye".
14. Citado por Prigogine, Stengers (1983).
15. El editor, Jorge Wagensberg, a quien debemos que este clásico por fin se pueda leer en español, es él mismo un físico que trabaja en el campo de los procesos irreversibles.
16. Citado por C. Birch en Ayala, Dobzhansky (1938), pág. 302.

## BIBLIOGRAFIA

- Ayala, F.J., (1968), "Biology as an autonomous Science". *American Scientist*, Vol. 56, No. 3.
- Ayala, F.J., T. Dobzhansky, Eds.: *Estudios sobre la filosofía de la biología*. Editorial Ariel, Barcelona.
- Von Bertalanffy, Ludwig (1976): *Teoría general de los sistemas*, Fondo de Cultura Económica, México.
- Boltzmann, Ludwig (1985): *Escritos de mecánica y termodinámica*. Alianza Editorial, Madrid.
- Careri, Giorgio (1984): *Order and Disorder in Matter*. Benjamin/Cummings, Menlo Park, California.

- Fayad, Ramón (1987): "¿Qué es la vida?": *¿Dio Schrödinger la respuesta?*
- Haken, Hermann (1975): "Introduction to Synergetics". En: "Synergetics", H. Haken (Ed). Springer Verlag.
- Jacob, François (1986): *La biología de lo viviente*, Editorial Salvat, Madrid.
- Lehninger, Albert (1980): *Bioquímica*, Editorial Omega, Madrid.
- Lucrecio (1979): *La naturaleza de las cosas*, Editorial Espasa-Calpe, Madrid.
- Maupertuis (1985): *El orden verosímil del cosmos*. Alianza Editorial, Madrid.
- Monod, Jaques (1986): *El azar y la necesidad*, Ediciones Orbis, Barcelona.
- Pauling, Linus (1938): *The Nature of the Chemical Bond*.
- Perutz, Max (1987): "Physics and the Riddle of Life". *Nature*, Vol 236, Abril 9 de 1987.
- Prigogine, I (1975): *Theory of Dissipative Structures*. En: *Synergetics*, Hermann Haken (Ed.), Springer Verlag.
- Prigogine, I., I. Stengers (1983): *La nueva alianza*, Alianza Universidad, Madrid.
- Ruse, Michael (1979): *La filosofía de la biología*, Alianza Universidad, Madrid.
- Schrödinger, Erwin (1986): "¿Qué es la vida?", Ediciones Orbis, Barcelona.
- Smith, C.U.M. (1977): *El problema de la vida*, Alianza Universidad, Madrid.
- Thomson, D'Arcy (1967): *Sobre el crecimiento y la forma*, Editorial Losada.
- Waddington y otros (1976): *Hacia una biología teórica*. Alianza Universidad, Madrid.
- Watson, James (1978): *La doble hélice*. Plaza y Janés, Barcelona.
- Von Wright, George Henrik (1979): *Explicación y Comprensión*, Alianza Universidad, Madrid.

TEORIA CUANTICA  
ALGUNAS CONSECUENCIAS FILOSOFICAS,  
CIENTIFICAS Y TECNOLOGICAS

CICLO DE CONFERENCIAS EN  
EL CENTENARIO DE

ERWIN SCHRÖDINGER  
1887 - 1963

6

RAMON FAYAD G. Profesor Departamento de Física, Facultad de Ciencias Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.E.- Colombia. Profesor Biofísica Universidad de Los Andes, Bogotá.

¿QUE ES LA VIDA?  
Y LA AUTORIDAD  
DE LA PALABRA ESCRITA

6

RAMON FAYAD G.

ACLARACION A MANERA DE RESUMEN (O VICEVERSA)

Algunos de ustedes han oído hablar del pequeño libro *¿Que es la Vida?* de ERWIN SCHRÖDINGER y quizás, ojalá, hayan tenido la oportunidad de leerlo.

En los cursos de mecánica cuántica es relativamente frecuente referirse a SCHRÖDINGER, un extraordinario pensador a quien hoy rendimos un merecido homenaje, no sólo como a uno de los creadores de esa área del conocimiento sino también como a un físico que desde la perspectiva de su disciplina hizo, con este libro, un significativo aporte a la comprensión de los fenómenos biológicos. Se habla, además, de la enorme influencia que tuvo el escrito sobre los físicos de la época, muchos de los cuales, hoy en la lista de los galardonados con el Nobel, cambiaron su trabajo en física atómica por la biología molecular.

En casi todos los libros con títulos parecidos a "Biofísica", "Biofísica molecular", "Física y Biología", "Biología y Mecánica Cuántica", se cita a SCHRÖDINGER y a su *¿Qué es la vida?* en los términos expuestos en el párrafo anterior.

En el contenido de la presente conferencia trato de demostrar que tanto el autor como el libro están definitivamente mal referenciados en la literatura sobre el tema. Me parece que casi todo (¿todo?) lo plasmado por SCHRÖDINGER en su escrito ya se había dicho. Sería totalmente desacertado descalificarlo por poco original pues el autor nunca reclamó originalidad en el tema ni, a mi entender, pretendió sugerir novedades. Por otra parte, la literatura le atribuye a *¿Qué es la vida?* la iniciación de programas de trabajo que ni siquiera se mencionan en el texto.

Aparte de S. Benzer, M. Wilkins y G. Stent no pude encontrar a otros físicos que acepten haber recibido influencia de *¿Qué es la vida?* en su realización profesional. Personalidades como Crick, Kendrew y Perutz, a quienes la literatura cita como "biólogos moleculares" gracias a la "orientación" de SCHRÖDINGER han declarado públicamente en escritos importantes de amplia difusión, que su cambio hacia la biología no tuvo ninguna influencia del pequeño libro, mientras que Luria, Hershey, Monod, Lwoff y Brachet (pioneros de la biología molecular y de la bioquímica, consolidados como tales en 1944) admiten (en versiones contradictorias) no haber recibido impacto alguno cuando el libro se publicó.

En mi opinión, se trata de un excelente libro de divulgación, pletórico de ideas pertinentes pero no nuevas. Al analizar las referencias he podido concluir que quienes lo citan como reafirmador o profeta de la investigación en biología molecular lo hacen por desinformación, por cortesía, o por ambas.

## I. INTRODUCCION

*¿Qué es la vida? El aspecto físico de la célula viva*, o simplemente *¿Qué es la vida?* un pequeño libro de ERWIN SCHRÖDINGER publicado por Cambridge University Press en 1944 se convirtió en un clásico. Mucho es lo que se ha escrito sobre él y quizás es más lo que se ha escrito sobre lo que se ha escrito sobre él.

Hace unos ocho años sentí la obligación de leerlo. Como físico interesado en los problemas de la biología consideré que debía ser parte de mi cultura general. Se trataba de la versión original y en aquella época mis conocimientos de inglés y biología eran exageradamente rudimen-

tarios. Recuerdo que algunos de mis profesores, sin ninguna argumentación, hacían referencia a la grandiosa contribución de SCHRÖDINGER a nuestra comprensión de los fenómenos de la vida, no por el descubrimiento de la famosa ecuación sino por las tesis sustentadas en *¿Qué es la vida?*. Recuerdo, también, el gran vacío que sentí al terminar de leer el libro. No encontré la tan mencionada contribución. Me ocurrió lo que suele pasar cuando se lee un texto corriente de física general: en él se analizan principios y leyes no propiamente descubiertas o establecidas por el autor y en no pocas ocasiones se consignan conceptos erróneos o revaluados aún en la época en la cual se imprimió el texto. El libro se vuelve atractivo por la presentación y por la elegancia del lenguaje en que está escrito.

Este año, al celebrarse el centenario del nacimiento de SCHRÖDINGER, los organizadores de este evento me han distinguido como uno de los expositores. Tomé nuevamente *¿Qué es la vida?*, busqué en mi biblioteca, en las de algunos colegas y en la literatura pertinente. El objetivo era claro. A través del contenido del libro y de ejemplos concretos presentaría como, sin *¿Qué es la vida?*, la biología no habría avanzado como lo ha hecho en las últimas cuatro décadas y mencionaría que el impacto de las tesis allí sustentadas había sido tal, que muchos físicos, hoy reconocidos, desviaron su atención y cambiaron su trabajo por la biología molecular. Hoy mi sensación de vacío es más intensa que hace ocho años. Tampoco puede hallar los aportes que se le atribuyen.

En mi búsqueda no estaba tan sólo. Encontré que Max Perutz (1987a, 1987b) en un trabajo publicado hace pocos meses con el fin de celebrar en el Reino Unido la efemérides que nos reúne en esta actividad dice:

"... un cuidadoso estudio del libro de SCHRÖDINGER y de la literatura relacionada con el tema me ha demostrado que lo que hay de cierto en el libro no era original y la mayoría de lo que era original se sabía que no era cierto cuando el libro se publicó".

Además enfatiza que :

"El mayor mérito de *¿Qué es la vida?* radica en haber popularizado el artículo de Timofeeff, Zimmer y Delbrück que de otra forma habría permanecido en la oscuridad fuera de los círculos de genetistas y radiobiólogos<sup>1</sup>".

En el mismo evento Linus Pauling (1987) dice, en forma por demás apasionada :

“¿Hasta qué punto, aparte de su descubrimiento de la ecuación de SCHRÖDINGER, contribuyó SCHRÖDINGER a la biología moderna y a nuestro entendimiento de la naturaleza de la vida? En mi opinión no hizo ninguna contribución y tal vez con su discusión de ‘entropía negativa’ con relación a la vida hizo una contribución negativa”.

Más adelante añade :

“Cuando leí el libro por primera vez, hace cuarenta años, me frustré. Mi opinión fue y sigue siendo que SCHRÖDINGER no contribuyó a nuestro entendimiento de la vida”.

Es oportuno, antes de continuar, aclarar que no se está discutiendo sobre los aportes de la física y en particular de la mecánica cuántica a la elucidación de los fenómenos que se manifiestan en los seres vivos. Se está haciendo referencia exclusiva a lo presentado por Schrödinger en su libro *¿Qué es la vida?*. Valga recordar que éste no debe considerarse como el “iniciador” de la problemática pues la interacción entre la física y la biología (ya sea como ciencias complementarias o como ciencias excluyentes) se ha planteado formalmente desde hace varios siglos. En los últimos 350 años podemos citar la máquina humana de Descartes, la mecánica del movimiento de los animales de Borelli, la electricidad animal de Galvani, la ley de la conservación de la energía de Mayer y Helmholtz, la mecánica estadística de Boltzmann y la comparación entre la evolución de un sistema físico aislado con la de las especies biológicas como sistemas abiertos; Bernstein y la interpretación física de los biopotenciales, Nernst con la entropía y el orden a temperatura ambiente, Donnan y el equilibrio en comportamientos separados por membranas semipermeables, Bohr y el principio de complementariedad en el edificio de las ciencias naturales, Volterra y la matematización de la ecología, Jordan y el derrumbe del mecanicismo causal de Laplace, la naturaleza del enlace químico y los aportes de Pauling, Lewis, Heitler y London, la estructura de macromoléculas y los análisis cristalográficos de Perutz, son apenas unos cuantos ejemplos de aproximaciones físicas (unas a nivel macro y otras a nivel microscópico) del fenómeno de la vida, llevadas a cabo por grandes pensadores cuyos trabajos han recibido, a su debido tiempo, el reconocimiento de lo que podría llamarse la comunidad científica mundial. Claro está que muchos de los planteamientos de los individuos citados han sido revaluados. Mi impresión es

la de que los trabajos recientes en el campo de la llamada “biofísica” están orientados por la permanencia de muchos conceptos formalizados por Wigner y de las ideas sobre el proceso de medida, introducidas por Von Neumann, ideas éstas que se debatían con profundidad antes de la publicación de *¿Qué es la vida?* (ver apéndice) mientras que la interpretación de los fenómenos fisiológicos (aún a nivel microscópico) parece que continúa, en la mayoría de los casos y con relativo éxito, bajo la visión de William Harvey, quien no se apartaba de considerar los sistemas biológicos como sistemas físicos.

Llegamos inevitablemente al álgido problema de lo que significaría la descripción por una parte y la explicación, por otra. Parece ser que en particular los fisiólogos fundamentan sus interpretaciones en principios tomados de la física y analizan de la misma manera el flujo de agua en una tubería, la circulación de la sangre en las arterias y el paso de una molécula a través de un canal de 5 Å de radio y 70 Å de largo. Todo parece indicar que se sienten cómodos porque sus sistemas no violan las leyes de la física macroscópica. El caso de los morfólogos, incluso después del advenimiento de la mecánica cuántica, no ha cambiado mayormente. No constituye una novedad mencionar que si se trata de estudiar con detalles la estructura de un organismo vivo con un microscopio electrónico el observador debe matar primero al organismo. Si bien con las técnicas más sofisticadas de la física y la química es posible describir las propiedades “físicas” de los seres vivos (estructura, tamaño, composición molecular) este tipo de análisis no responde a la pregunta ¿qué es la vida?.

Mientras algunas adoptan la posición de admitir que la vida por una parte y los mecanismos que rigen el comportamiento de la materia inerte por otra, obedecen a los mismos principios de las leyes estadísticas de la física, otros aceptan que entre los organismos vivos y los no vivos existen contradicciones irreconciliables. Pero, la pregunta ¿qué es la vida? seguirá, por ahora, vigente para los dos “bandos”. La mecánica cuántica y en particular SCHRÖDINGER parece que no han aportado nada verdaderamente significativo para responder a la pregunta. La mecánica cuántica podrá describir *todas* (?) las interacciones entre los miles de millones de partículas que hacen parte del organismo vivo más elemental, pero no veo muy claro que la determinación de una estructura muerta necesariamente clarifique su función vital. Por otra parte, si se trata de analizar la contribución original de SCHRÖDINGER a la respuesta, me ha sido imposible encontrarla.

## II. SCHRÖDINGER Y ¿QUE ES LA VIDA?: ¿RECLAMO ORIGINALIDAD?

Podría tratar de sustentar mis sensaciones de vacío al no encontrar la originalidad de *¿Qué es la vida?*, haciendo referencia a ciertos hechos que no dejan de ser llamativos. Algunos de los párrafos escogidos del librito y los escritos por otros autores se encuentran frecuentemente citados en la literatura. Los de éstos son atribuidos a SCHRÖDINGER como algo "nunca dicho" y a los de éste les confieren propiedades inspiradoras sobre aspectos que no se discuten ni se mencionan en el texto. Por ejemplo, en el capítulo final de su libro, SCHRÖDINGER concluye (con relación a la herencia):

"Estamos enfrentados con un mecanismo completamente diferente al mecanismo probabilístico de la física. Uno que no puede reducirse a las leyes ordinarias de la física, no sobre la base de que existe una 'nueva fuerza' que dirige el comportamiento de los átomos individuales dentro de un organismo, sino debido a que su estructura es diferente de cualquier otra estudiada hasta ahora en los laboratorios de física".

Doce años antes, Bohr (1933) en su ampliamente difundida conferencia *Light and Life* había dicho :

"Los organismos revelan propiedades y potencialidades que contrastan marcadamente con las exhibidas por la denominada materia inanimada bajo condiciones experimentales sencillas. . ."

"El incesante intercambio de materia que está inseparablemente conectado con la vida implicará la imposibilidad de considerar un organismo como un sistema de partículas bien definido, de partículas materiales como los sistemas considerados que en cualquier caso dan cuenta de las propiedades físicas y químicas de la materia".

En otro aparte de *¿Qué es la vida?* se encuentra :

"A partir de todo lo que hemos aprendido sobre la estructura de la materia viva, debemos estar dispuestos a encontrar que funciona de una manera que no puede reducirse a las leyes ordinarias de la física".

Bohr, en la citada conferencia anotó :

"El reconocimiento de la importancia esencial de los hechos fundamentalmente atomísticos de los organismos vivos de ninguna manera es suficiente para encontrar una explicación comprensible de los fenó-

menos biológicos. La cuestión a debatir, por consiguiente, es si algunos tratamientos fundamentales están perdidos en el análisis de los fenómenos naturales, antes de que podamos alcanzar un entendimiento de la vida sobre la base de la explicación física".

Mientras SCHRÖDINGER refiriéndose a la estructura de la fibra del cromosoma escribe

". . . este es el caso de las moléculas orgánicas, cada vez más complicadas, en las cuales cada átomo y cada grupo de átomos, desempeña un papel individual, no enteramente equivalente al de muchos otros (como en el caso de la estructura periódica). Con pleno fundamento podríamos llamarlo un cristal o un sólido aperiódico. . ."

Delbrück en el artículo publicado con Timofeeff y Zimmer en 1935 había dicho:

"Dejamos abierto el asunto de hasta qué punto el gen es una entidad que surge de la repetición de estructuras atómicas idénticas o hasta qué punto tal periodicidad está ausente. . ."

En su libro y refiriéndose a, cómo un organismo vivo evita la rápida degradación al estado inerte de "equilibrio", SCHRÖDINGER dice

"Es absurdo suponer que el intercambio de material sea el punto esencial. Cada átomo de nitrógeno, oxígeno, azufre, etc., es tan bueno como cualquier otro de su tipo. . . Por algún tiempo, en el pasado, se silenció nuestra curiosidad con la afirmación de que nos alimentamos de energía. . . un organismo vivo aumentará constantemente su entropía o, como también puede decirse, produce entropía positiva. . . Solo puede mantenerse lejos de la muerte, es decir vivo, extrayendo continuamente entropía negativa de su medio ambiente. . ."

En 1886 en una conferencia sobre la segunda ley de la termodinámica Boltzmann había expresado (Boltzmann, 1886):

". . . la batalla general de la existencia de los organismos vivos no es por las substancias básicas (estas substancias abundan en el aire, en el agua, en el suelo) tampoco lo es por la energía que todo cuerpo tiene en abundancia, aunque desafortunadamente en forma no disponible, sino que es por la entropía la cual se convierte en disponible por la transición de energía del sol caliente a la tierra fría".

A pesar de que el contenido fundamental de los párrafos escritos por SCHRÖDINGER y por otros autores sea diferente, el punto a desta-

car consiste en que en la literatura sobre el tema las ideas se atribuyen, siempre acomodaticamente, a *¿Qué es la vida?* y, como se mencionó, al pequeño libro le confieren la propiedad de haber sido el inspirador de programas de trabajo sobre tópicos que el mismo SCHRÖDINGER elude, a propósito, en su escrito.

No es pertinente continuar con estos paralelismos que pueden parecer tendenciosos ni entrar a analizar algunos aspectos de tipo biológico que se describen en *¿Qué es la vida?* y que estaban revaluados en 1944. Tampoco quisiera mencionar los problemas cruciales de la genética, de la estabilidad de las macromoléculas de importancia biológica, del orden a partir del orden, que estaban más o menos elucidados cuando se publicó el libro y que SCHRÖDINGER, quizás por desconocimiento, no consignó en su escrito. El lector interesado puede encontrar una amplia discusión en la revisión hecha por Haldane (1945), Yoxen (1979), Pauling (1987), Perutz (1987a, 1987b) y en las referencias citadas en estos trabajos.

### III. ¿QUE ES LA VIDA? Y SU INFLUENCIA

No he podido encontrar tampoco la definitiva influencia que se le ha atribuido a *¿Qué es la vida?* sobre los físicos que terminaron en la biología. Lo único claro es el que sobre los biólogos su influencia fue totalmente nula.

Respecto al impacto de *¿Qué es la vida?* sobre los físicos de la época y a los nuevos rumbos que tomó la biología después de la publicación, el asunto es bastante controversial. Es frecuente encontrar en varios libros de texto y en otras de divulgación (exceptuando los de genética) referencias a SCHRÖDINGER y a su libro mencionándolos como pioneros de la denominada biología molecular, pero no se dice por qué. En estos libros no se registra ni una sola vez en qué consistió la originalidad o principio novedoso de lo expuesto por SCHRÖDINGER en *¿Qué es la vida?*

Jean Hladik (1982), por ejemplo, en su libro *Biofísica* dice gratuitamente

“Una obra como *¿Qué es la vida?* . . . contribuyó seguramente al desarrollo del interés de los investigadores hacia el estudio de las estructuras elementales de las moléculas que constituyen las bases de los procesos celulares”

pues SCHRÖDINGER no planteó este problema en su escrito.

John Gribbin (1986) atribuye a *¿Qué es la vida?* la orientación que dieron a su trabajo Crick, Kendrew, Perutz, Wilkins y Franklin, motivados por el “planteamiento de SCHRÖDINGER sobre la necesidad de otra clase de física para explicar el fenómeno genético”. Curiosa afirmación pues SCHRÖDINGER, por el contrario, descartó este planteamiento. Esto, es más un planteamiento de Bohr (Ver nota 6). Además, Watson (1968) en su conocido libro “La doble hélice” había dicho (refiriéndose a Crick):

“Un factor importante que contribuyó a su abandono de la física y el desarrollo de un acusado interés por la biología había sido la lectura, en 1946, por la obra del célebre físico teórico ERWIN SCHRÖDINGER *¿Qué es la vida?* . . .”

Pero, según la cita de Olby (1971), Crick ha sostenido que

“No puedo recordar ocasión alguna en que Jim Watson y yo discutieramos las limitaciones del libro de SCHRÖDINGER. Pienso que la razón principal para ello es el que estábamos fuertemente influenciados por Pauling quien tenía en esencia las ideas correctas. Por lo tanto nunca desperdiciamos tiempo discutiendo si deberíamos pensar en la forma en que lo hizo SCHRÖDINGER o en la que hizo Pauling. Nos parecía obvio que debíamos seguir a Pauling<sup>2</sup>”.

Perutz (1987b) afirma

“No puedo recordarme a mí mismo, ni a Crick, ni a Watson, ni a Kendrew haber discutido el contenido del libro de SCHRÖDINGER sobre biología molecular estructural durante los años que pasamos juntos en el Cavendish Laboratory”.

Añade Perutz, citando a Stanley Cohen, que pocos científicos del gran número de participantes en el curso sobre fagos de Delbrück en Cold Spring Harbor en 1944 había leído a SCHRÖDINGER.

“. . . y, en todas las actividades sociales e intelectuales de estos veranos de postguerra no recuerdo mención alguna a SCHRÖDINGER”.

Gunter Stent (1968) quien reconoció la decisiva influencia que recibió del libro y que lo condujo a orientar su trabajo de físico hacia la biología, cita a *¿Qué es la vida?* en los siguientes términos

“En 1945, inmediatamente después de termina la Segunda Guerra Mundial, apareció un pequeño libro que popularizó los hasta ahora más o menos esotéricos puntos de vista y les aseguró una audiencia más amplia<sup>3</sup>”.

A pesar de que en una parte de su artículo Stent cita constantemente a SCHRÖDINGER, se refiere a él más como a un pregoneador que en lenguaje elegante hizo públicos algunos aspectos conocidos que como a alguien que verdaderamente aportó una idea nueva en el campo. Para finalizar, en las referencias y Notas del artículo, dedica un extenso párrafo para mencionar que a Luria el libro le pareció solo excitante por la formulación del cristal aperiódico pero que la influencia de *¿Qué es la vida?* fue definitiva para Watson y Benzer.

No deja de llamar la atención el hecho de no encontrar en muchísimos trabajos, ni en simposios importantes, ni en investigaciones de frontera, referencia alguna al aporte original de *¿Qué es la vida?*. En *Proceedings of the First International Conference on Theoretical Physics and Biology* (1969) en donde aparecen las contribuciones de varios de los participantes (algunos ya premiados con el Nobel y otros, como I. Prigogine, que serían galardonados algunos años después) no se registra, en ninguna de las intervenciones, ni por una vez, referencia al libro. Ni en el trabajo de Fröhlich (*Quantum Mechanical Concepts in Biology*) ni en el de Pullman (*Les Calculs Quantiques en Biologie*) que consideran las expresiones macroscópicas del sistema estructural biológico desde un punto de vista microscópico, ni en la exposición de Prigogine (*Structure, dissipation and life*) sobre termodinámica en sistemas lejos del equilibrio, aparece al menos una cita a Schrödinger o a su libro.

Sería demasiado sesgado no reconocer que Prigogine años más tarde (1972) refiriéndose a que

“... la aparente contradicción entre orden biológico y las leyes de la física —en particular la segunda ley de la termodinámica— no puede resolverse mientras tratemos de entender los sistemas vivos por los métodos familiares de la mecánica estadística y de la, también familiar, termodinámica”.

dice que Von Bertalanffy (1940) y SCHRÖDINGER (1944) han insistido sobre la importancia de este hecho biológico (el hecho es que los sistemas biológicos son “abiertos”, son sistemas que continuamente inter-

cambian materia y energía con el medio ambiente<sup>4</sup>). Pero, en mi opinión, Boltzmann (1886) y Bohr (1933) ya habían dicho esto. Delbrück, parafraseando a su profesor, también lo había ratificado en 1935, posición ampliada por el mismo Delbrück en 1949.

En trabajos tan reconocidos como los de Mehra (1973) sobre mecánica cuántica y biología, la única referencia a SCHRÖDINGER se hace indirectamente a través de una cita de un libro de Glansdorff y Prigogine, pero es claro que no tiene relación con *¿Qué es la vida?* pues se trata de un artículo de Schrödinger publicado en 1935 en *Naturwissenschaften*<sup>5</sup>.

Un hecho curioso es el que en el artículo de Perutz (1987b), en el de Stent (1968) y en el de Mehra (1973) se citan las mismas frases tomadas de la célebre conferencia de Bohr (1933) destacándolas como gran aporte y refiriéndose a éste como pionero de la propuesta de “nuevas leyes” para el análisis de los sistemas biológicos<sup>6</sup>. Cuando Delbrück (1949) y posteriormente Elaässer (ver Fröhlich 1969 pág. 74) hicieron referencia a las expresiones de Bohr (a quien siempre emularon) debieron hacerlo con cautela y justificar cada palabra por temor a ser “ingenuamente mal interpretados y a ser calificados de inspiradores de un derrotismo innecesario o de un vitalismo irracional” (Stent 1968).

En mi opinión, en los libros de texto y en los dos de divulgación sobre el tema (ver por ejemplo, Volkenstein, 1977, 1982, 1985; Davydov, 1982) se hace referencia a SCHRÖDINGER y a *¿Qué es la vida?* con el ánimo de o bien legitimar una postura reduccionista o de mostrar falsamente que con la publicación del pequeño libro se inició formalmente la extensión de los principios y leyes de la física microscópica a la elucidación de los problemas biológicos, o de, en casos extremos, mostrarle al lector que el autor del libro sabe de la existencia de *¿Qué es la vida?*. Otros (por ejemplo, Brillouin, 1956; Lwoff, 1978) toman frases y expresiones de *¿Qué es la vida?* para ilustrar las descripciones de sus textos. Tales frases y expresiones más que tesis o hipótesis novedosas son en verdad comentarios pertinentes. En el libro *Advances in Quantum Chemistry*, Löwdin (1965) rinde homenaje a SCHRÖDINGER al titular el capítulo a su cargo *Quantum genetics and the aperiodic solid*. Pero la referencia a *¿Qué es la vida?* solo se hace para tomar la expresión *aperiodic solid*, mientras Bass (1977) en su artículo *A Quantum Mechanical Mind-Body Interaction* atribuye a SCHRÖDINGER la originalidad en concebir al gen como un cristal aperiódico, lo que condujo a clarificar el papel del DNA.

Cuando SCHRÖDINGER refiriéndose al mecanismo de la replicación, cifra enormes esperanzas en otras disciplinas diciendo

“... el avance prosigue y continuará, estoy seguro, a partir de la bioquímica, bajo las directrices de la fisiología y la genética”

no pretente mencionar algo novedoso. Sencillamente está adoptando la posición más o menos generalizada de la genética molecular de su tiempo: los problemas relevantes de la biología necesitaban, para su elucidación, de la bioquímica. Perutz (1987b) inexcusablemente ignora este párrafo de *¿Qué es la vida?*.

Sobre la influencia que tuvo el pequeño libro me parece que Stent (1968) exagera al afirmar

“En *¿Qué es la vida?* Schrödinger anunció el amanecer de una nueva época en la investigación biológica a sus colegas físicos, cuyo conocimiento de la biología estaba confinado a las viejas leyes de la botánica y la zoología”

pues da la impresión, en la forma en que está presentada, que el anuncio no se hubiera hecho nunca antes. (La opinión de Stent aparece casi textualmente copiada en el ensayo de Jacob (1970, 1986) sin que éste inexplicablemente cite la referencia).

Las reflexiones sobre los aportes de *¿Qué es la vida?* me han llevado a concluir que, si los hay, no se deben, en ningún momento, a que Schrödinger haya pretendido presentar ideas nuevas, propuestas nuevas o a reportar observaciones de fenómenos biológicos desconocidos en 1944. Creo que tanto el pequeño libro como su autor han sido inadecuadamente referenciados en los trabajos sobre el tema. En un escrito que se analizó en el presente evento, Bromberg (1987) dice acertadamente

“... por haber escrito el librito de divulgación *¿Qué es la vida?* Schrödinger ha sido llamado a comparecer a juicio ante el tribunal de la historia acerca de su aporte al pensamiento biológico”.

Sin bien Bromberg puede llegar a la conclusión de que sí hubo ideas inspiradoras, se hace necesario, entonces, considerar sus argumentos y analizar si en verdad se trata de propuestas nuevas.

*¿Qué es la vida?* es, sin más ni menos, un magistral libro de divulgación científica. Sin saber con certeza las motivaciones que condujeron

a SCHRÖDINGER a escribirlo (quizás la única, fue su característica de pensar universal) me parece que su propósito es una mezcla de algunos que pueden animar a un divulgador de la ciencia (excluyo, desde luego, los fines comerciales, políticos, los de justificación del gasto público y los de simplemente traducir a lenguaje popular resultados o teorías científicas formuladas originalmente en lenguaje especializado).

Creo que quienes califican a SCHRÖDINGER de maestro e iniciador de la biología molecular no solamente están buscando propósitos que no se pretenden en *¿Qué es la vida?* sino que, tal vez, le están atribuyendo responsabilidades que no tienen por qué ser suyas.

Quienes, a lo mejor como yo, escarbamos (posiblemente en forma sesgada) lo más sutil del pequeño libro con el ánimo de mostrar que no estaba al tanto de los problemas de frontera de la genética de su época, que no consigna de ‘buena fe’ aspectos conocidos de la bioquímica en ese entonces, o que la influencia del libro sobre los pensadores de las décadas siguientes no fue tan marcada como se cree, estamos pecando de emocionales. El propio Schrödinger en el prefacio, refiriéndose al anhelo de encontrar un conocimiento unificado universal ofrece ‘una excusa’ por haber escrito el libro diciendo

“Yo no veo otra escapatoria... (si queremos que nuestro objetivo no se pierda para siempre) que la de proponer que algunos de nosotros se aventuren a emprender una tarea sintetizadora de hechos y teorías aunque a veces tengan de ellos un conocimiento incompleto e indirecto y aún a riesgo de engañarnos a nosotros mismos”.

Más adelante al hacer una descripción del tema a tratar en el libro dice

“... a pesar de la variedad de temas implicados, toda la empresa pretende transmitir una sola idea: hacer un breve comentario a un problema amplio e importante”.

Creo que SCHRÖDINGER ni siquiera modestamente hubiera pretendido con su libro marcar un derrotero ni anunciar un nuevo amanecer en la investigación biológica con el planteamiento de tesis originales. Ni siquiera creo que su intención haya sido la de motivar a los físicos de la post-guerra para reorientar su trabajo. Muy pocos son los que con sus propias palabras aceptan públicamente haber recibido influencia directa del libro. Mientras algunos mencionan que la influencia la recibieron otros, éstos la reconocen ante unos y la desmienten ante otros.

En *¿Qué es la vida?* el autor nunca reclamó originalidad y somos nosotros quienes sin motivo lo descalificamos por plagario.

#### IV. APENDICE. LECTURAS SUGERIDAS

No existe en la literatura una tendencia específica sobre la aproximación física al problema de la vida. El lector interesado puede referirse a algunos trabajos que he considerado significativos.

Sobre las interacciones a nivel microscópico y estabilidad de estructuras de membranas biológicas, véase Israelachvili, Marcelja y Horn (1980). Sobre analogías que, en mi opinión, en la forma establecida no ilustran prácticamente nada, el trabajo de Davydov (1975, 1977, 1979) relacionado con la contracción muscular ha sido muy difundido. Sobre la termodinámica de sistemas abiertos lejos del equilibrio, es indudable que el trabajo de Prigogine y Stengers (1984) y el de Prigogine (1975) merecen especial mención por su gran aporte. Los estudios de Tuszynski, Paul, Chatterjee y Sreenivasan (1984) tienen el particular interés de sugerir, como lo hiciera Fröhlich (1968, 1970, 1972, 1975, 1977), nuevas propiedades (no nuevas leyes) físicas en los sistemas biológicos comparadas con las mismas propiedades en los sistemas inertes. Los estudios sobre los principios de auto-organización y evolución de macromoléculas y que constituyen una gran contribución a la formalización del origen de las especies aparecen resumidos en el trabajo de Eigen (1971). El interesante punto de vista sobre sinérgica (el mantenimiento del orden y el mecanismo de empleo de la información en sistemas biológicos) se encuentra en Haken (1978). Los ensayos recopilados en *Hacia una biología teórica* (Waddington, 1976) parecen ser de lectura obligatoria. En cuanto a especulaciones que, a mi entender, rayan en la ridiculez, los trabajos de Jahn y Dunne (1986) vale la pena ojearlos, ojearlos y olvidarlos.

Las concepciones de Bohr, Delbrück y Von Neumann sobre las malinterpretadas "nuevas leyes" y sobre el conocimiento de que el resultado de una observación modifica la función de onda del sistema y que esta modificación es "en general impredecible antes de que la impresión ganada en la interacción (el proceso de medida) ha entrado en nuestra conciencia" se encuentran ampliamente desarrolladas por Wigner (1967).

Creo que mientras todas las investigaciones realizadas por biólogos parten del principio claramente plasmado por Bohr en su conferencia *Light and Life*.

"La existencia de la vida debe considerarse como un hecho elemental que no se puede explicar pero que debe tomarse como un punto de partida en Biología, de la misma manera que el cuanto de acción aparece como un elemento irracional de la mecánica clásica de la física. . .".

las investigaciones hechas por físicos no siempre tienen que partir de ese principio pues para la mayoría la existencia de la vida es precisamente el problema a resolver.

#### V. REFERENCIAS

- Bass, L. (1977) *Found. Phys.* 7 (3/4), 221.
- Bertalanffy, L. V. (1940), En: I. Prigogine et. al. *General System Theory*, Braziller, New York (1968).
- Bohr, N. (1933) *Nature* 131, 421.
- Bohr, N. (1963) *Essays 1958-1962: On Atomic Physics and Knowledge*, Interscience, New York.
- Boltzmann, L. (1886), En: *Escritos de mecánica y termodinámica*, Alianza Editorial, Madrid (1986) pág. 72.
- Brilouin, L. (1956), *Science and Information Theory*, Academic Press, New York.
- Bromberg, P. (1987), *Schrödinger y la biología: el drama de la interdisciplinarietà*, (Publicado en este mismo evento).
- Crick, F.H.C., citado por R.C. Olby, *J. Hist. Biol.* 4, 119 (1971).
- Davydov, A.S. (1975), *Biofizika* 19, 670.
- Davydov, A.S. (1977) *J. Theor. Biol.* 66, 379.
- Davydov, A.S. (1979) *Int. J. Quant. Chem.*, 16, 5.
- Davydov, A.S. (1982) *Biology and Quantum Mechanics*, Pergamon Press, N.Y.
- Delbrück, M. (1949) *Trans. Conn. Acad. Arts Sci.*, 38, 173.
- Eigen, M. (1971) *Naturwissenschaften* 58, 465.

- Frank, P. (1949) *Modern Science and its Philosophy*, Harvard Univ. Press, Cambridge, Mass. (capítulo 8).
- Fröhlich, H. (1969) En: *First International Conference on Theoretical Physics and Biology*, Versailles, 1967, M. Morais, ed., Amsterdam, North Holland.
- Fröhlich, H. (1968) *Phys. Lett.* 26A, 402.
- Fröhlich, H. (1970) *Nature* (London) 228, 1093.
- Fröhlich, H. (1972) *Phys. Lett.* 39A, 113.
- Fröhlich, H. (1975) *Phys. Lett.* 51A, 21.
- Fröhlich, H. (1977) *Nuovo Cimento* 7, 416.
- Glandsdorff, P., and I. Prigogine (1971) *Thermodynamic Theory of Structure, stability and fluctuations*, John Wiley and Sons, N.Y.
- Gribbin, J. (1986) *En busca del gato de Schrödinger*, Salvat Editores, Barcelona (pág. 131).
- Haken, H (1978) *Synergetics*, Springer-Verlag, Berlin.
- Haldane, J.B.S. (1945) *Nature* 155, 375.
- Hladik, J. (1982) *Biofísica*, Fondo de Cultura Económica, México (pág. 31).
- Jacob, F. (1970) *La logique du vivant*, Editions Gallimard, Paris (pág. 279).
- Jacob, F. (1986) *La lógica de lo viviente*, Salvat Editores, Barcelona (pág. 259).
- Jahn, R.G., and B.J. Dunne (1986) *Found. Phys.* 16(8), 721.
- Israelachvili, J.A., S. Marcelja and R.G. Horn (1980) *Quarter. Revs. Biophys.* 13, 2, 121.
- Löwdin, P.O. (1965) *Advances in Quantum Chemistry*, Academic Press, N.Y.
- Lwoff, A. (1978) *El orden biológico*, Siglo XXI Editores, México.
- Mehra, J. (1973) *Quantum Mechanics and the Explanation of Life*, *American Scientist*, 61, 722.
- Neumann, J.V. (1932), En: *Quantum Mechanics and the Explanation of Life*, J. Mehra, *Am. Scientist* 61, 722 (1973).
- Neumann, J.V. (1955), *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, Princeton Univ. Press, New Jersey.
- Pauling, L (1987) En: *Schrödinger Centenary Celebration of a Polymath*. Cambridge University Press, Cap. 18.

- Perutz, M.F. (1987a) En: *Schrödinger: Centenary Celebration of a Polymath*. Cambridge University Press, Cap. 19.
- Perutz, M.F. (1987b) *Nature* 326, 555.
- Prigogine, I. (1969) En: *First International Conference on Theoretical Physics and Biology*, Versailles, 1967, M. Marois, ed. Amsterdam, North Holland.
- Prigogine, I. and I. Stengers (1984) *Order out of chaos*, Bantam Books, New York.
- Prigogine, I., G. Nicolis and A. Babloyantz (1972) *Physics Today*, 25, 23, 38.
- Prigogine, I. (1975) *Theory of Dissipative Structures*. En: *Synergetics*, Hermann Haken (Ed.), Springer-Verlag, Berlin.
- Pullman, B. (1969) En: *First International Conference on Theoretical Physics and Biology*, Versailles, 1967, M. Marois, ed., Amsterdam, North Holland.
- Schrödinger, E. (1944) *¿Qué es la vida?*, Cambridge University Press (2a. Edición en español, Cuadernos infimos, Tusquets Editores, Barcelona, 1982).
- Stent, G.S. (1968) *Science* 160, 390.
- Tuszynski, J.A., R. Paul, R. Chatterjee and Sreenivasan (1984) *Phys. Rev.* (30/5), 2666.
- Volkenstein, M.V. (1977) *Molecular Biophysics*, Academic Press, N.Y.
- Volkenstein, M.V. (1982) *Physics and Biology*, Academic Press, N.Y.
- Volkenstein, M.V. (1985) *Biofísica*, Editorial MIR, Moscú.
- Waddington, C.H. (1976) *Hacia una biología teórica*, Alianza Editorial, Barcelona.
- Watson, J. (1968) *The double helix*, New American Library, N.Y. (pág. 18).
- Wigner, E.P., (1961) *The Scientist speculates*, I.J. Good ed., London.
- Wigner, E.P. (1967) *Symmetries and Reflexions*, Indiana Univ. Press, Bloomington, Indiana.
- Yoxen, E.J. (1979) *Hist. Sci.* 17, 17.

## NOTAS

1. Se refiere a un extenso artículo de Timofeeff, Zimmer y Delbrück publicado en 1935, en el que se analizaba la naturaleza física de las mutaciones.

2. Crick no menciona la contraposición en las dos formas de pensar
3. Se refiere a los puntos de vista de Delbrück, Zimmer y Timoffef en la publicación de 1935.
4. Posteriormente en su libro *Order out of chaos* Prigogine and Stengers (1984) no citan ni por una vez a Schrödinger.
5. Mehra no da la cita exacta pero se refiere a: P. Glansdorff and I. Prigogine, *Thermodynamic theory of structure, stability and fluctuations*, John Wiley and Sons, N.Y. (1971).
6. Esta propuesta ha causado gran controversia. Unos lo califican de vitalista y otros lo interpretan como quien sugirió "una manera diferente" de estudiar la vida en contraste con el método de análisis de la materia inerte. Las ideas de Bohr pueden encontrarse elaboradas en Bohr (1963). Un trabajo de P. Frank (1949) describe cómo las ideas de Bohr fueron utilizadas fragmentariamente para descalificarlo.

TEORIA CUANTICA

ALGUNAS CONSECUENCIAS FILOSOFICAS,  
CIENTIFICAS Y TECNOLOGICAS

CICLO DE CONFERENCIAS EN  
EL CENTENARIO DE

ERWIN SCHRÖDINGER  
1887 - 1963

7

*VIRGILIO NIÑO Z. Profesor Grupo de Física Teórica Departamento de Física, Facultad de Ciencias Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.E. - Colombia.*

# INTERPRETACION DE LA MECANICA CUANTICA SCHRÖDINGER COPENHAGUE

---

7

VIRGILIO NIÑO C.

## INTRODUCCION

En el año 1900 comenzó una época importantísima en el desarrollo de la Física. Max Planck estableció las bases de la Teoría Cuántica para poder explicar la dependencia con la frecuencia y con la temperatura de radiación térmica de un cuerpo negro. Para esto Planck impuso que la energía de los átomos de la pared-asimilados u osciladores era discreta siendo un múltiplo entero de  $h\nu$  donde  $\nu$  es la frecuencia de la radiación emitida y  $h$  una constante. Esta hipótesis de Planck contradice los resultados de la mecánica clásica, en la cual la energía de un oscilador armónico es continua.

Otros efectos particulares condujeron también a hipótesis que estaban en clara contradicción con lo esperado de la teoría electromagnética de Maxwell. Quizás, es el efecto fotoeléctrico el más relevante. Al incidir radiación electromagnética sobre la superficie de un material se pueden desprender de él electrones, siendo su energía cinética proporcional a la frecuencia de la radiación incidente e independiente de la

intensidad de la misma, lo cual está en contradicción con la teoría de Maxwell. Para explicar este efecto, Albert Einstein (1905) supuso que la radiación electromagnética de frecuencia  $\nu$  está compuesta de cuantos. Cada uno con energía  $E = h\nu$ , estos cuantos llamados fotones tienen una masa  $m = h\nu/c^2$  que surge de la conocida relación entre masa y energía relativista  $E = mc^2$ . La masa en reposo de los fotones es cero y su momentum está dado por  $p = mc = h/\lambda$  siendo  $\lambda = 1/\nu$  la longitud de onda del fotón.

Para explicar los resultados de la espectroscopia atómica Bohr (1913) introdujo sus famosos postulados. En esta descripción del átomo de hidrógeno incluyó la hipótesis cuántica de Planck. En la teoría de Bohr el electrón tenía ciertas órbitas permitidas en las que no emitía energía electromagnética y en las cuales  $\oint P dx = nh$  ( $n$ : número entero y  $x$  posición del electrón en la órbita). El electrón podía pasar de una órbita a otra emitiendo o absorbiendo una cierta cantidad de energía dada por  $h\nu = E_{\text{inicial}} - E_{\text{final}}$ . Estas hipótesis de Bohr plantean una radical contradicción con la física clásica.

Los anteriores cambios y/o complementos a la teoría clásica tuvieron un gran éxito para "explicar" varios fenómenos, sin embargo, la situación era poco satisfactoria. Por una parte algunos resultados, como los espectros de átomos con varios electrones o el enlace químico, no pudieron ser explicados con las mencionadas hipótesis y por otra parte la teoría existente era claramente un conglomerado clásico al que se le habían agregado algunos postulados extraños a la misma teoría y/o contradictorios a ella misma. Parece entonces evidente que se realizaran grandes esfuerzos para obtener una teoría coherente capaz de explicar todos estos efectos. Como resultado de tal búsqueda nació la mecánica cuántica en la forma de la mecánica matricial de Heisenberg (1925) y en la forma de la mecánica ondulatoria de SCHRÖDINGER (1926), quien también estableció la equivalencia matemática entre estas dos teorías. Lo anterior conjuntamente con el principio de incertidumbre de Heisenberg (1927) y las discusiones fundamentales de Bohr (1928) sentaron las bases de la mecánica cuántica moderna, llevándola al final de su base inicial de desarrollo.

En esta breve exposición nos vamos a concentrar esencialmente en los problemas de interpretación en esa primera fase de desarrollo. Confrontaremos la interpretación de SCHRÖDINGER con la de la escuela de Copenhague representada por Bohr, Born Heisenberg, Jordan entre otros

## LA MECANICA ONDULATORIA

En 1924 sustentó Louis de Broglie su disertación en la Sorbona. El transplantó la dualidad de la luz planteada por Einstein a la materia, desarrollando una teoría ondulatoria para las partículas de materia: "Es de suponer que existe una ley natural, tal que a cada cuanto de energía de masa en reposo  $m_0$  esté asociado un fenómeno periódico de frecuencia  $\nu_0$ , de tal forma que la relación  $h\nu_0 = m_0c^2$  sea válida. . . Esta hipótesis es la base de nuestro sistema: Ella es tan valiosa como cualquier hipótesis, es decir, vale tanto como las consecuencias que de ella se deduzcan"<sup>1</sup>. Este fue el origen de las ondas de materia, siendo válidas para ellas las relaciones  $E = h\nu$ ,  $p = h/\lambda$ . Así describió de Broglie partículas libres planteándose la dualidad onda partícula pues en estas expresiones se relacionan características ondulatorias con características de partículas las cuales son mutuamente excluyentes. ¿Cómo se comportan las partículas cuando están bajo la influencia de fuerzas? A esta pregunta respondió SCHRÖDINGER en su famosa serie de artículos<sup>2</sup> "Cuantización como un Problema de Valores Propios". Como ya se ha explicado en otra conferencia<sup>3</sup> de este mismo ciclo una deducción de la ecuación de SCHRÖDINGER, su relación con la óptica y se ha descrito someramente el contenido de las publicaciones de 1926.

de SCHRÖDINGER, vamos a concretarnos a discutir lo relacionado con su interpretación.

Para describir las propiedades ondulatorias de la materia dedujo SCHRÖDINGER una ecuación de campo clásica que representa para las ondas de materia lo que la teoría electromagnética de Maxwell representa para la radiación electromagnética. Partículas como electrones no son interpretadas como partículas Newtonianas sino como campos de amplitud  $\Psi(\underline{r}, t)$  cuya dependencia de la posición  $\underline{r}$  y del tiempo  $t$  queda determinada por la ecuación de campo. Una partícula<sup>4</sup> está, entonces, más o menos esparcida en el espacio, dependiendo de la amplitud, como una nube de materia. La ecuación de SCHRÖDINGER para una onda de materia cargada que se mueve bajo la influencia de un potencial  $V(\underline{r}, t)$  es

$$\frac{1}{i} \frac{\partial \psi}{\partial t} - \frac{1}{2\mu} \nabla^2 \psi + \Upsilon V \psi = 0 \quad (1)$$

En (1)  $\mu$  y  $\Upsilon$  aparecen como propiedades del campo;  $\mu$  determina la dispersión de la onda de materia libre y  $\Upsilon$  caracteriza el acople entre el

campo de materia y el potencial, determinando la desviación del campo de materia en ese potencial. Aunque la forma en que está escrita la ecuación (1) no es la usual, se resalta el hecho de que la ecuación de SCHRÖDINGER es una ecuación clásica de campo que describe las propiedades ondulatorias de la materia de la misma forma que las ecuaciones de Maxwell describen las propiedades ondulatorias de los campos electromagnéticos.

Un enlace entre las imágenes corpuscular y ondulatoria existe si tomamos

$$m = \hbar\mu, \quad q = \hbar\Upsilon \quad (\hbar = h/2\pi) \quad (2)$$

siendo  $m$  y  $q$  la masa y la carga de la partícula en cuestión. Se expresa en esta forma la relación entre las características del campo con las de partícula a través de la constante de Planck.

De la misma forma que existen para las ecuaciones de Maxwell leyes de conservación para la densidad de energía, de momentum etc., se pueden deducir de la ecuación de SCHRÖDINGER leyes de conservación que llevan a definiciones de densidad de energía, de momentum etc. revistiendo el campo de materia de propiedades físicas.

Tomando la ecuación (1) y su compleja conjugada y efectuando algunas operaciones algebraicas sencillas se encuentra la ecuación de continuidad: (hemos usado las relaciones (2))

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \underline{J} = 0 \quad (3)$$

donde

$$\rho = K\psi^*\psi \quad (4)$$

$$\underline{J} = K \frac{\hbar}{2mi} [\psi^* \nabla \psi - \psi \nabla \psi^*] \quad (5)$$

Las relaciones (4) y (5) expresan la densidad,  $\rho$ , y la densidad de corriente,  $\underline{J}$ , del campo de materia;  $K$  es una constante sobre la cual aún se dispone. Al integrar la ecuación de continuidad sobre todo el espacio se obtiene:

$$\frac{d}{dt} \int_{\infty} \rho d\tau + \oint_{\infty} \underline{J} \cdot d\mathbf{a} = 0 \quad (6)$$

en donde la integral de superficie desaparece si suponemos que en una esfera infinita no entra corriente. Es evidente que  $\int \rho d\tau$  es una medida

de la cantidad total de materia considerada y que permanece constante: conservación de materia

$$\int_{\infty} \psi^* \psi d\tau = N = \text{cte.} \quad (7)$$

El valor de  $N$  no está determinado por la ecuación de SCHRÖDINGER\*. Si se interpreta a  $\rho$  como la densidad de masa, entonces  $\int \rho d\tau = M$  será la masa total del campo de materia y se obtiene para la constante  $K$  la relación  $K = M/N^{**}$ . Si interpretamos a  $\rho$  como la densidad de la distribución de carga eléctrica, es decir, si  $\int \rho d\tau$  es la carga total,  $Q$ , del campo de materia, la constante  $K$  sería  $Q/N$ . Lo anterior expresa la interpretación de SCHRÖDINGER de la función. La cantidad  $N$  es la "intensidad" total del campo de materia y se podría suponer que en una imagen corpuscular representa el número total de partículas contenidas en el campo, lo que sucede realmente al cuantizar el campo de materia; las cantidades  $M/N$  y  $Q/N$  son la masa y carga de una partícula, sin embargo, esto último se sale de la interpretación original de SCHRÖDINGER.

Si uno multiplica la ecuación de SCHRÖDINGER por  $\partial \psi^*/\partial t$ , su compleja conjugada por  $\partial \psi/\partial t$  y suma, obtendremos:

$$\nabla \cdot \underline{S} + \frac{\partial \omega}{\partial t} = 0 \quad (8)$$

en donde ( $U = qV$ )

$$\omega = \frac{\hbar^2}{2m} \nabla \psi \cdot \nabla \psi^* + U \psi^* \psi \quad (9)$$

$$\underline{S} = - \frac{\hbar^2}{2m} \left( \frac{\partial \psi^*}{\partial t} \nabla \psi + \frac{\partial \psi}{\partial t} \nabla \psi^* \right) \quad (10)$$

El término  $U \psi^* \psi$  representa la densidad de la energía potencial asociada al campo de materia debido a su interacción con el mundo externo. El término  $\frac{\hbar^2}{2m} \nabla \psi \cdot \nabla \psi^*$  es la densidad de energía cinética y por lo tanto  $\omega$  es la densidad de energía del campo de materia.  $\underline{S}$  representa la densidad de flujo de energía y la ecuación (8) da el balance de energía del campo de materia.

Una ecuación similar existe para el campo electromagnético en donde  $\underline{S}$  es el vector de Poynting. Al integrar la ecuación (8) sobre todo el espacio obtenemos conservación de energía para el campo de materia: (suponiendo que  $U$  no depende del tiempo).

$$\frac{d}{dt} \int \omega d\mathbf{r} = 0$$

Es posible definir algunas cantidades que tienen análogo en la mecánica clásica. El centro de masa del campo de materia se define:

$$\mathbf{R}(t) = \frac{1}{N} \int \psi^* \mathbf{r} \psi d\mathbf{r} \quad (11)$$

Con la ayuda de la ecuación de SCHRÖDINGER podemos calcular su variación en el tiempo, obteniéndose

$$Nm \frac{d\mathbf{R}}{dt} = \mathbf{P} \quad (12)$$

donde  $\mathbf{P}$  es el momentum total de campo:

$$\mathbf{P} = \frac{\hbar}{i} \int \psi^* \nabla \psi d\mathbf{r} \quad (13)$$

Tomando la derivada respecto al tiempo de (13) y usando la ecuación de SCHRÖDINGER se obtiene

$$\frac{d\mathbf{P}}{dt} = - \int \psi^* \nabla \mathbf{U} \cdot \psi d\mathbf{r} \quad (14)$$

El término  $-\psi^* \nabla \mathbf{U} \cdot \psi$  se puede interpretar como la densidad de fuerza, siendo su integral sobre todo el espacio la fuerza total que actúa sobre el campo de materia; obtenemos de esta manera analogías con la mecánica de Newton. En forma similar se puede definir el momentum angular total del campo de materia como:

$$\mathbf{L} = \frac{\hbar}{i} \int \psi^* \mathbf{r} \times \nabla \psi d\mathbf{r} \quad (15)$$

Se puede demostrar que

$$\frac{d\mathbf{L}}{dt} = \int -\psi^* (\mathbf{r} \times \nabla \mathbf{U}) \psi d\mathbf{r} \quad (16)$$

o sea que la variación en el tiempo del momentum angular es la integral sobre todo el espacio de la densidad de momento.

Una discusión detallada sobre estos últimos puntos se puede encontrar en las referencias 4 y 5.

Aunque la interpretación original de SCHRÖDINGER tiene varias características atractivas plantea, varios problemas:

— Los potenciales escalar y vectorial que aparecen en la ecuación de SCHRÖDINGER para estudiar el movimiento del campo de materia en un campo electromagnético<sup>4</sup> provienen, en principio, de campos externos. Sin embargo, la carga espacial  $\rho$  y la corriente de  $\mathbf{J}$  pueden ser también fuentes de campos electromagnéticos que a su vez influirían sobre la función  $\psi$ . Para poder tratar con esta auto-interacción electromagnética es necesario tener en cuenta las ecuaciones (3), (4) y (18) para la densidad de carga y corriente del campo de materia y al reemplazarlas en las ecuaciones de Maxwell se obtiene un sistema de ecuaciones diferenciales que acoplan el campo de materia con el campo electromagnético. Un efecto de la distribución espacial de carga es el siguiente. En la ecuación de SCHRÖDINGER aparece la influencia del potencial eléctrico proveniente de la distribución espacial de carga y de los campos externos. El primero se puede calcular de la ecuación de Poisson. Tenemos entonces las siguientes ecuaciones

$$\frac{\hbar}{i} \frac{\partial \psi}{\partial t} - \frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi + V(\mathbf{r}) \psi + q\varphi(\mathbf{r}) \psi = 0 \quad (19)$$

$$\nabla^2 \varphi + 4\pi q \psi^* \psi = 0 \quad (20)$$

en donde se ha escrito explícitamente el potencial  $V(\mathbf{r})$  asociados con los campos externos. Solucionando la ecuación (20) y reemplazándola en (19) obtenemos

$$\left[ \frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial t} - \frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{r}) + q^2 \int \frac{\psi^*(\mathbf{r}',t)\psi(\mathbf{r}',t)}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} d\mathbf{r}' \right] \psi(\mathbf{r},t) = 0 \quad (21)$$

Esta es una ecuación integro-diferencial no lineal<sup>5</sup> para la función  $\Psi$

La influencia de la interacción coulombiana repulsiva (cuarto término de la ecuación) es en regiones de alta intensidad bastante grande. Si vamos a describir por ejemplo, un electrón por medio de una onda de materia, debemos calcular la función  $\psi$  usando la ecuación (21), donde la interacción coulombiana representaría una repulsión del electrón consigo mismo. En el átomo de hidrógeno, por ejemplo, esa

autointeracción no se comprueba experimentalmente. En el primero de los artículos de 1926, SCHRÖDINGER<sup>2</sup> estudió el átomo de hidrógeno sin tener en cuenta la autointeracción, lo cual es incompatible con la interpretación que él mismo dió al campo de materia<sup>6</sup>. Cuando hay varios electrones la auto-interacción se manifiesta experimentalmente.

— Si no actúan sobre el sistema fuerzas externas, la solución más general de la ecuación de SCHRÖDINGER se puede escribir como una superposición de ondas planas, es decir, como un paquete de ondas, que se puede escribir: (la forma usual de escribirlo es

$$\psi(\underline{r}, t) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2}} \int c(\underline{k}) e^{i(\underline{k} \cdot \underline{r} - \frac{\hbar^2 k^2}{2m} t)} d\underline{k}$$

$$\psi(\underline{r}, t) = \int K(\underline{r}, \underline{r}', t) \psi(\underline{r}', 0) d\underline{r}' \quad (22)$$

con

$$K(\underline{r}, \underline{r}', t) = \left(\frac{m}{2\pi i \hbar t}\right)^{3/2} e^{im(\underline{r} - \underline{r}')^2 / 2 \hbar t} \quad (23)$$

Si suponemos que en  $t = 0$  el paquete está fuertemente localizado, por ejemplo en forma de una función delta, se obtiene de (22) que  $\psi(\underline{r}, t) \sim K(\underline{r}, 0, t)$  o sea que para  $t > 0$  la densidad  $\rho \sim |\psi|^2$  es constante espacialmente. Por consiguiente la localización de un campo de materia no permanece constante en el tiempo, es como si se actuara sobre el campo de materia sin fuerzas externas. Un ejemplo muy usual (4,5) es el de tomar la función  $\psi(\underline{r}', 0)$  como una distribución Gaussiana. El tiempo en el cual el ancho del paquete se duplica es  $\Upsilon = \sqrt{3} m a^2 / \hbar$  siendo  $a$  el ancho inicial del paquete. Si tomamos un electrón y  $a \leq 10^{-8}$  cm tenemos que  $\Upsilon \lesssim 10 s^{-16}$  A o sea que el paquete se dispersa muy rápidamente, deslocalizándose la partícula. Esto indica que la interpretación que se ha dado no es adecuada.

— Vale la pena señalar explícitamente que una teoría clásica de campo para la materia elemental no puede dar por sí sola una descripción adecuada. Con ella solo es posible describir propiedades ondulatorias de la materia pero no las corpusculares. Esta situación es la misma que ocurre con la teoría electromagnética de Maxwell; con ella se describen los efectos ondulatorios pero no se puede aclarar, por ejemplo el efecto fotoeléctrico.

## LA INTERPRETACION DE COPENHAGUE

La mecánica del átomo desarrollada por Bohr (1913) era, como señalamos al comienzo un conjunto de hipótesis y recetas de cálculo. Los problemas eran usualmente resueltos clásicamente y luego se aplicaban ciertas condiciones cuánticas, normalmente se traducían al lenguaje cuántico usando el principio de correspondencia de Bohr (1923)<sup>7</sup>. Heisenberg<sup>6</sup> reemplazó la descripción de Bohr por lo que él llamó magnitudes observables. El trabajo estaba basado en que las conclusiones de una teoría física sólo pueden estar relacionadas con aquellas cantidades que en principio son susceptibles de ser medidas. Heisenberg planteó dudas sobre las trayectorias con radios fijos del átomo de Bohr, pues no eran observables y empleó más bien las energías de excitación del electrón y las frecuencias de transición. El experimento de Franck-Hertz demostraba la cuantización de la energía del átomo. El llamado por Born "die drei Männer Arbeit"<sup>7</sup> (el trabajo de los tres hombres, Born, Heisenberg y Jordan) fue la primera exposición completa de los fundamentos de la mecánica cuántica en su formulación matricial. SCHRÖDINGER<sup>8</sup> demostró la equivalencia matemática entre la mecánica ondulatoria y la matricial. El procedimiento algebraico de Heisenberg hace énfasis en la discontinuidad mientras que el procedimiento de SCHRÖDINGER lo hace en la continuidad.

Tres puntos vamos a discutir. La dualidad onda-partícula, el problema del determinismo y el significado de la función de onda, en la ecuación de SCHRÖDINGER.

Varios experimentos muestran que la materia elemental se comporta como partícula o como onda según las circunstancias, ejemplos son las de rayos  $\alpha$  y  $\beta$  en una cámara de Wilson y la difracción de electrones. La materia y la radiación se manifiestan según el experimento como partícula o como onda pero no simultáneamente como ambos. La frontera dentro de la cual la imagen corpuscular y la ondulatoria se concilian está dada por el principio de indeterminación o incertidumbre de Heisenberg<sup>9</sup>: existen determinadas fronteras de precisión en la determinación simultánea de algunas cantidades físicas. Para el caso del momento y posición de una partícula se tiene

$$\Delta x \Delta p_x \geq \hbar/2 \quad (24)$$

Para conocer una cierta cantidad física de un sistema hay que efectuar una medida con un aparato. La medida se realiza a través de la interacción aparato-sistema. Si el sistema es macroscópico la influencia de la interacción con el aparato puede en principio hacerse tan pequeña como se quiera lo cual no ocurre en el caso de sistemas microscópicos. La relación (24) resuelve por completo el problema de la dualidad onda partícula.

Es necesario señalar que las leyes de la física clásica surgen de la observación y medida sobre sistemas macroscópicos. La mecánica clásica, en particular, usa una descripción de los sistemas basada en el conocimiento simultáneo de la posición y del momentum de cada partícula. Todas las teorías clásicas están basadas en el determinismo mecánico y en la posibilidad de una medida directa de las cantidades físicas en donde el aparato es prácticamente independiente de lo observado. El determinismo clásico plantea que si las cantidades físicas que describen completamente un sistema son conocidas en un instante determinado y si se conoce su interacción con el mundo externo, es posible conocer en forma precisa el futuro del sistema al resolver la ecuación de movimiento. Claramente la relación de incertidumbre (24) rompe con el determinismo clásico.

En la interpretación de Copenhague<sup>10</sup> se hace énfasis en que relacionar un efecto determinado a una causa determinada tiene no sólo sentido cuando ambos pueden ser medidos sin introducir elementos extraños que perturben la interrelación. La ley causal, en su forma clásica tendría entonces solo sentido para sistemas aislados. Como toda descripción cinemática (espacio-temporal) de un proceso implica su observación, se sigue que la descripción cinemática del proceso y la causalidad clásica se excluyen mutuamente, representando aspectos complementarios del fenómeno.

La teoría matemática formal de la mecánica cuántica planteada en las referencias (6,7) no es interpretable como una teoría que exprese relaciones entre objetos que existen en el espacio-tiempo. Lo anterior puede resumirse así<sup>11</sup>:

#### Teoría clásica

- Fenómenos descritos en términos espacio y tiempo.
- Ley causal.

#### Teoría Cuántica

##### Descripción 1:

- Fenómenos descritos en términos de espacio y tiempo.
- Principio de Indeterminación.

##### Descripción 2:

- Esquema matemático que no describe fenómenos en el espacio tiempo.
- Causalidad.

Volvamos de nuevo a la función de onda. Estudiando procesos de colisiones atómicas Born<sup>12</sup> planteó una nueva interpretación para la función de onda que aparece en la ecuación de SCHRÖDINGER: la cantidad  $\psi(\underline{r},t)\psi^*(\underline{r},t)d\underline{r}$  representa la probabilidad de que una partícula en el instante  $t$  esté en el elemento de volumen  $d\underline{r}$  alrededor de  $\underline{r}$ . La función  $\psi$  en si misma obedece una ley causal que refleja en la solución de la ecuación (1). El hecho de que  $\int \psi^*\psi d\underline{r}$  sea constante, ecuación (7), representa la conservación de la probabilidad total. En mecánica cuántica los observables están representados por operadores, así por ejemplo, el momentum se representa por  $\hbar\nabla/i$ . Los resultados dados en las ecuaciones (11), (16) siguen siendo válidos si se entienden como valores esperados del correspondiente operador.

#### CONCLUSION

La interpretación más aceptada de la mecánica cuántica, hoy en día, es la dada por la escuela de Copenhague. Dentro del esquema formal de esa interpretación la ecuación de SCHRÖDINGER es un postulado de la teoría; otros postulados se refieren al problema de la medida<sup>13</sup>. Los problemas relacionados con la interpretación de la teoría no acabaron en esa época sino que siguen hasta nuestros días. De Broglie, Einstein, Schrödinger, Bohr, Bell, etc. nunca estuvieron de acuerdo con la interpretación dada. En una serie de conferencias en abril de este año y en un evento similar a este se revive la problemática, en particular las referencias (14) y (15) pueden ser de mucho interés para el lector.

## REFERENCIAS

1. L. De Broglie, Ann, d, Phys, 22, 3, (1925), Tesis (1924).
2. E. Schrödinger, Ann, Phys, 361, 489, 79 (1926), 437, 80 (1926), 109, 81, (1926).  
Artículos reproducidos en E. Schrödinger. Die Wellenmechanik. E. Bettenberg Verlag, Stuttgart (1963), Ed, A. Hermann.
3. G. Castillo. La Ecuación de Schrödinger y el nacimiento de la mecánica cuántica Este mismo ciclo de conferencias.
4. S. I. Tomonaga. Quantum Mechanics Vol. II, John Wiley & Sons, New York, (1966).
5. E. Fick. Einführung in die Grundlagen der Quantentheorie. Akademische Verlagsgesellschaft, Frankfurt (1974).
6. W. Heisenberg, Z, Phys, 879, 33, (1925).
7. M. Born, W. Heisenberg, P. Jordan, Z, Phys, 557, 35, (1926).
8. E. Schrödinger, Ann, Phys, 734, 79, (1926).
9. W. Heisenberg, Z, Phys, 172, 43, (1927).
10. N. Bohr, Naturwiss, 245, 16, (1928).

Las referencias (9) y (10) están reproducidas en: W. Heisenberg, N. Bohr. Die Kopenhagener Deutung der Quantentheorie. E. Battenberg Verlag. Stuttgart (1963). Ed. A. Hermann.

11. W. Heisenberg. The Physical Principales of the Quantum theory. Dover. Chicago, (1930).
12. Cinco artículos originales reprodcidos en M. Born. Zur statistischen Deutung der Quantentheorie. E. Battenberg Verlay, Stuttgar, (1962). Ed. A. Hermann.
13. C. Cohen-Tannoudji, B. Diu, F. Laloë, Mécanique Quantique I. Hermann, Paris (1977).
14. J. Dorling. Schrödinger's original interpretation of the Schrödinger equation: a rescue attempt. En: Schrödinger centenary celebration of a polymath. Cambridge University Press, Cambridge, Ed. C.W. Kilmister. (1987).
15. J.S. Bell. Are There Quantum Jumps? Libro citado en la ref. (14).

## NOTAS

1. A electrones, protones etc. se les llama partículas. Esta palabra es tomada de la imagen corpuscular de la materia y puede conducir inicialmente a confusiones. Quizás sería adecuado introducir otra palabra, por ejemplo materia elemental tal que en la imagen corpuscular sea una partícula y en la imagen ondulatoria de la materia sea un campo de materia. La mecánica cuántica describiría, entonces, esa materia elemental. Esto está estrechamente relacionado con el principio de complementariedad de Bonr
2. Debido a la homegeneidad de la ecuación si  $\psi$  es solución,  $b\psi$  también lo es, siendo  $b$  una constante compleja cualquiera.
3. Las dimensiones de  $\psi$  están correlacionadas con las de  $N$ :  $\dim \psi = (\dim N)^{1/2}$  (longitud)<sup>-3/2</sup> si se escoge  $N$  sin dimensiones, entonces  $\dim \psi = (\text{longitud})^{-3/2}$
4. La ecuación de SCHRODINGER en este caso.  

$$\frac{\hbar}{i} \frac{\partial \psi}{\partial t} + \frac{1}{2m} \left( \frac{\hbar}{i} \nabla - \frac{q}{c} \underline{A} \right)^2 \psi + q\varphi\psi = 0 \quad (17)$$
en donde  $\underline{A}$  es el potencial vectorial y  $\varphi$  el potencial escalar. La densidad de corriente eléctrica en este caso es  

$$\underline{J} = \frac{q\hbar}{2m} [ \psi^* \left( \frac{\hbar}{i} \nabla - \frac{q}{c} \underline{A} \right) - \text{c.c.} ] \quad (18)$$
5. La no linealidad implica que el principio de superposición deja de ser válido.
6. Schrödinger<sup>2</sup> siempre dió a la función  $\psi$  la interpretación de distribución de materia. Consideró los estados cuantizados del electrón en un átomo de hidrógeno como oscilaciones propias del campo de materia de la misma forma como se consideran las oscilaciones propias de un medio continuo por ejemplo una membrana. Schrödinger trató de hacer equivalente la interpretación de  $\rho$  como densidad de carga con la siguiente: " $\psi\psi^*$  es una especie de función pero en el espacio de configuración del sistema. La configuración del sistema es la superposición de todas las configuraciones cinemáticas posibles. Podría decirse que el sistema se encuentra simultáneamente en todas las posiciones cinemáticas pero no en todas con igual intensidad".
7. Las predicciones de la teoría cuántica deben corresponder a las predicciones de la física clásica en el límite en que los números cuánticos involucrados sean muy grandes. Planck había ya planteado: "Una teoría clásica está caracterizada por el hecho de que  $h$  sea muy pequeño".

TEORIA CUANTICA  
ALGUNAS CONSECUENCIAS FILOSOFICAS,  
CIENTIFICAS Y TECNOLOGICAS

CICLO DE CONFERENCIAS EN  
EL CENTENARIO DE

ERWIN SCHRÖDINGER  
1887 - 1963

8

*ALICIA GUERRERO DE MESA. Profesora Grupo de Física Teórica Departamento de Física Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.E. - Colombia.*

## CAUSALIDAD Y SENTIDO DEL TIEMPO

8

*ALICIA GUERRERO DE MESA*

“Lo más asombroso del tiempo es que el tiempo avanza”, escribió Eddington en un libro, que, sin duda, vale la pena releer hoy<sup>1</sup>. ¿Es esta “flecha del tiempo” algo más que una ilusión subjetiva? Y, en caso afirmativo, de ¿dónde proviene? La irreversibilidad que ella implica ¿podrá ser lógicamente deducida de las llamadas por Eddington “leyes primarias” de la física, que son intrínsecamente reversibles?<sup>2</sup> ¿O tendrá su raíz en una ley irreductible, y, en este sentido, fundamental, aunque pertenezca al dominio de las “leyes secundarias?”

Por otra parte, si existe una diferencia objetiva entre pasado y futuro, tendríamos una base firme para distinguir causa y efecto. Pero ¿cuál es el status del concepto de causalidad en la física de nuestros días? La revolución cuántica expulsó de la ciencia el mito del determinismo estricto y colocó en el fundamento de toda realidad un elemento irreductible de azar. Después de esto los físicos se vieron obligados a traducir todo su saber al lenguaje de las probabilidades y solo se permiten hablar de la causalidad con extrema cautela, como si temieran infringir un mandamiento de las nuevas Tablas de la Ley. Y, sin embargo, la causalidad sigue en el fondo rigiendo toda la actividad humana, incluida la actividad científica. Pero, ¿cómo es posible conciliar indeterminismo y causalidad, términos al parecer irreconciliables? A este segundo interrogante dio SCHRÖDINGER una respuesta que coincide con la de Eddington y que no suscita hoy mayor controversia. El problema del sentido del tiempo sigue abierto.

## LAS FLECHAS TEMPORALES

Es innegable la fascinación que ejerce sobre el espíritu el problema del tiempo, “aquel algo enigmático y en apariencia contradictorio que, sin embargo, constituye el fundamento de la existencia del mundo y de nosotros mismos”, según la expresión de Gödel<sup>3</sup>. Pero el científico de nuestros días no se plantea la pregunta sobre la naturaleza del tiempo en los términos torturantes que han hecho célebre el Libro XI de las Confesiones de San Agustín: “¿Quién detendrá este pensamiento, quién lo inmovilizará para darle un poco de estabilidad, para abrirlo a la intuición del esplendor de la eternidad siempre inmóvil? (. . .) Pero estos dos tiempos, el pasado y el futuro, ¿cómo *son*, si el pasado ya no es y el futuro no es aún? El presente mismo, si fuera siempre presente sin perderse en el pasado, no sería tiempo, sería eternidad. Pues, si el presente, para ser *tiempo*, debe perderse en el pasado, ¿cómo podemos afirmar que él *es* también, puesto que su única razón de ser es dejar de ser?”<sup>4</sup>.

A Einstein no lo preocupa la “naturaleza” del tiempo. Para él *tiempo es lo que medimos con relojes*; su énfasis recae en la geometría, no en la metafísica. El parte del Yo-tiempo o tiempo subjetivo como de un dato anterior a la ciencia: “Este, en sí mismo, no es mensurable”<sup>5</sup>.

El espacio, este otro fundamento de la existencia, se nos aparece, por el contrario, con una realidad carente de misterio.

Tal vez por ello los físicos han tratado de “resolver” el enigma del tiempo reduciéndolo al espacio. Un siglo después de Newton, Lagrange trata formalmente el tiempo en sus ecuaciones como cuarta componente espacial. Con la teoría de la relatividad culmina este esfuerzo por “espacializar” el tiempo. Según la célebre frase de Einstein: “El devenir es un espacio tridimensional se transforma de algún modo en un ser en un mundo cuadrimensional”. Es el triunfo —transitorio, como se verá después— del *ser* sobre el *devenir* y, para algunos, la reducción de la temporalidad a una intuición puramente subjetiva. Para Hermann Weyl “el tiempo es la forma de la corriente de la conciencia, . . . el espacio es la forma de la realidad corporal. (. . .) Subjetivamente hay un abismo entre nuestros modos de percepción del tiempo y del espacio; pero de esta diferencia cualitativa no quedan huellas en el universo objetivo que la física busca depurar de la intuición inmediata. Este universo es un continuo de cuatro dimensiones; no es ni “espacio” ni “tiempo”. Es

solamente la conciencia quien, al moverse en un dominio de este universo, experimenta la sección que viene hacia ella y se queda atrás como *Historia*, como un proceso que se desenvuelve en el espacio y se desarrolla en el tiempo”<sup>6</sup>. Una visión semejante parecería dar razón al poeta que escribe: “Pasamos nosotros; el tiempo, no”<sup>7</sup>.

Einstein parece haber oscilado entre concepciones opuestas. Y si bien su fe incommovible en el determinismo y su horror al azar lo llevan de modo natural a pensar que todo lo que “ocurre” de alguna manera pre-existe desde siempre —puesto que está rigurosamente determinado por las condiciones iniciales del universo— no puede eludir la pregunta: “¿Tiene sentido dotar la línea de universo con una flecha y decir que B es anterior a P y A es posterior a P?” ¿O podemos invertir la flecha temporal? Su respuesta es negativa: “No se puede elegir libremente la flecha. . . No se puede telegrafiar al pasado”<sup>8</sup>. Y concluye con esta observación: “Lo esencial aquí es que el envío de una señal es un proceso no invertible, en el sentido de la termodinámica, un proceso que está ligado con el crecimiento de la entropía (mientras que, según nuestro conocimiento actual, todos los procesos elementales son reversibles)”.

¡Qué extraño giro! La teoría que lleva al máximo la simetría entre espacio y tiempo se ve forzada a tomar en préstamo de la termodinámica, una ciencia considerada fenomenológica, un criterio para distinguir el pasado del futuro. La señal luminosa, que juega en la construcción de la teoría un papel crucial, solo puede viajar del pasado hacia el futuro y se convierte así en el prototipo de las “cadenas causales”.

Antes de proseguir conviene esclarecer algunos términos del problema:

- 1 Las leyes fundamentales de la física son invariantes, es decir, simétricas con respecto a inversión del sentido del tiempo. Esta invariancia implica absoluta reversibilidad en el mundo de los procesos elementales: Todo proceso podría desarrollarse igualmente en la dirección opuesta del tiempo sin violar ninguna ley dinámica. (Las pequeñas violaciones de esta simetría temporal en la interacción débil solo significan que la inversión del tiempo debe acompañarse de inversión espacial e inversión de carga, para que el proceso visto en este riguroso espejo espacio-temporal sea compatible con la ley física. Sin embargo, según opinión de algunos autores, esta violación

de simetría temporal, observable en algunos procesos donde intervienen mesones K, constituiría una flecha microscópica del tiempo).

2. En oposición con este mundo elemental, regido por leyes reversibles, en el mundo macroscópico predominan los procesos irreversibles. Hay una violación *de hecho* de la invariancia con respecto a inversión de la flecha del tiempo: los procesos inversos no se observan.
3. Se ha establecido que ninguna de las flechas fácticas conocidas puede ser *deducida* de las leyes fundamentales. Por la simple razón de que lo irreversible no puede surgir de lo reversible, a menos que en el camino se introduzca algún elemento extraño a la teoría. Durante algún tiempo se pensó que Boltzmann había logrado el milagro con su teorema H. Pero, en respuesta a la contundente objeción de su colega Loschmidt, es él mismo quien despeja la ilusión: "La segunda ley de la termodinámica nunca puede ser probada matemáticamente con la sola ayuda de las ecuaciones de movimiento<sup>9</sup>". Esto significa que la termodinámica no puede ser reducida a la mecánica.

En general, si se quiere imponer un sentido del tiempo a los procesos fundamentales, es necesario introducir una regla adicional que prohíba (en sentido estadístico) la existencia de soluciones que impliquen la destrucción de la flecha del tiempo. En los tratados de mecánica relativista, electrodinámica o teoría del campo cuántico esta regla suplementaria se oculta tras argumentos confusos de "causalidad".

4. En la naturaleza coexisten diversas flechas temporales. ¿Cómo se relacionan entre sí? ¿Hay una jerarquía entre ellas?

Existe, en primer lugar, *la flecha termodinámica* surgida de la segunda ley: "A parte de pequeñas fluctuaciones, la entropía de un sistema aislado no puede disminuir. Aumenta en el transcurso del tiempo hasta alcanzar el máximo valor en el equilibrio". Esto implica la existencia de procesos espontáneos en la naturaleza: "El calor no puede pasar espontáneamente del cuerpo más caliente al más frío". El proceso inverso puede ocurrir, pero no de manera espontánea. (Es el caso de un refrigerador donde es necesaria la intervención de algún agente externo capaz de realizar trabajo sobre el sistema). Esta ley del crecimiento de la entropía implica la tendencia al desorden, al caos, en los sistemas que no intercambian energía con sus alrededores.

Esta parece ser la flecha más comúnmente aceptada por los físicos como flecha primordial. Reichenbach propone explícitamente la siguiente definición: "La dirección positiva del tiempo es la dirección en la cual ocurre la mayoría de los procesos termodinámicos en sistemas aislados<sup>10</sup>".

*La flecha electromagnética* fue de hecho la adoptada por Einstein bajo la forma de irreversibilidad de las señales luminosas. Las ecuaciones de Maxwell permiten soluciones "avanzadas", donde las ondas convergen hacia el foco para reconstruir la señal emitida. Generalmente se eliminan tales soluciones porque implicarían correlaciones entre regiones infinitamente separadas y se declaran admisibles solo las soluciones "retardadas".

*La flecha de la evolución biológica* parece oponerse a la segunda ley de la termodinámica. Pero se trata sólo de una apariencia. La segunda ley no prohíbe la aparición de orden, esto es, la disminución de entropía en ciertos sectores de la naturaleza. Pero tampoco los explica, por tratarse de procesos de auto-organización de sistemas no aislados, en situaciones muy alejadas del equilibrio termodinámico.

*La expansión del universo* suministra, en opinión de muchos físicos, la flecha primordial del tiempo. Con ella compite la contracción gravitacional que conduce a la aparición de huecos negros, merced a la capacidad calorífica negativa de los sistemas gravitatorios y a su capacidad para contraerse indefinidamente.

Esta flecha cosmológica posee la ventaja de dotar al tiempo con un comienzo absoluto: el instante de la gran explosión, el "big-bang".

Pero hay una conjetura de Landau que en los últimos años ha ganado fuerza: La idea según la cual la clave de la irreversibilidad macroscópica estaría en la mecánica cuántica, más bien que en la termodinámica. Tendríamos así una flecha fundamental del tiempo. Los desarrollos teóricos a que ha dado lugar esta conjetura son demasiado complejos para ser descritos aquí. Sin embargo, el núcleo de la argumentación es simple: La mecánica cuántica contiene la descripción de un mundo perfectamente reversible, cuya evolución temporal está regida por la ecuación de Schrödinger. Pero el postulado interpretativo, que conecta el formalismo matemático con datos observables, sólo permite hacer predicciones probabilísticas a partir del conocimiento del estado cuántico del sistema. La medición introduce así "en los fenómenos cuánticos una no equivalencia física de los dos sentidos del tiempo<sup>11</sup>". Es posible que en

la explicación de la irreversibilidad de los procesos de medida intervengan factores puramente cuánticos y, simultáneamente, factores cosmológicos. En tal dirección podría hallarse la unificación de las diversas flechas temporales. Pero todo esto permanece todavía en el nivel de una conjetura<sup>12</sup>.

## EL REENCUENTRO CON LA CAUSALIDAD

La física, al establecer una diferencia objetiva entre pasado y futuro, crea el fundamento objetivo para una distinción entre causas y efectos. La causalidad sigue siendo, como para Kant, condición a priori de toda experiencia, en particular, de la experiencia científica. Pues, para decirlo con Meyerson, todo razonamiento científico "es un razonamiento causal, una hipótesis acerca de la naturaleza de las cosas externas, acerca de las supuestas causas de los fenómenos"<sup>13</sup>. Es evidente que el diseño de un experimento carecería de sentido sin la aceptación implícita del principio de causalidad: "Cada observación presupone una cadena causal y entrega un resultado visible. Solo una cosa no podemos hacer: reunir los fragmentos visibles y las cadenas causales en el modelo de una naturaleza en-sí". Pero esto, prosigue Weizsäcker, no invalida el a-priori Kantiano; pues un átomo en-sí no puede ser objeto de experiencia directa<sup>14</sup>.

En un universo sometido a un determinismo rígido no hay sitio para una flecha del tiempo ni para una relación causa-efecto unidireccional y asimétrica. Hoy nadie, al menos entre los científicos, pone en duda la validez de la segunda ley de la termodinámica. Y todos admiten que esta tendencia al desorden en los sistemas aislados, consagrada en ella, permite distinguir objetivamente pasado de futuro. Pero nadie ha podido "deducirla" a partir de las leyes reversibles que rigen los procesos elementales, sin introducir un ingrediente de azar, a veces bajo el disfraz de argumentos estadísticos (igualdad de probabilidades "a priori", etc.) o con apelaciones a la teoría de la información ("no es posible conocer el estado preciso del sistema", etc.). Según la excelente formulación de Schrödinger: "Desde el punto de vista del físico el azar está en la raíz de la causalidad"<sup>15</sup>.

Este elemento aleatorio está, pues, allí, en el corazón de un mundo donde los procesos irreversibles son la regla y los reversibles la excepción o, más bien, el caso-límite.

Sin embargo, el prestigio de la ciencia, como el de los antiguos brujos o sacerdotes, reposa en gran medida en la exactitud de sus predicciones. El determinismo no ha desaparecido. Se ha refinado convirtiéndose en un determinismo estadístico que, merced a la "ley de los grandes números", permite hacer pronósticos de una precisión asombrosa. Aunque el sitio exacto donde un electrón golpeará una película fotográfica o el instante preciso en que un átomo excitado emitirá un fotón permanezcan impredecibles por principio, el enorme conglomerado de partículas que constituyen un cuerpo macroscópico presentará un comportamiento susceptible de determinación a partir de ciertas condiciones iniciales. O, para decirlo con la gracia y la brevedad de Sir Arthur Eddington: "El eclipse de 1999 es tan cierto como el balance de una compañía de seguros de vida; el próximo salto cuántico de un átomo es tan incierto como la duración de su vida o de la mía"<sup>16</sup>.

Pero hay algo más que la restauración del determinismo y la causalidad en su acepción estadística. Merced a esta unión de ley reversible y azar, ecuación de Schrödinger e indeterminismo, el tiempo recupera su sentido real: el futuro no está escrito rigurosamente en el pasado.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. A.S. Eddington, *The nature of the physical world*, Cambridge University Press, 1953 (pág. 68).
2. *Ibid.* (pág. 75). Para Eddington las leyes primarias son las que rigen el comportamiento de entes individuales; las leyes secundarias son de carácter estadístico; "la segunda ley de la termodinámica, si bien es una ley reconocida de la naturaleza, es, en cierto sentido, una ley secundaria".
3. Albert Einstein als Philosoph und Naturforscher (Ed. por A Schilpp), Vieweg, 1979 (pág. 406).
4. San Agustín, *Confessions*, Société d'éditions Les Belles Lettres, Paris, 1947 (Libro XI, pág. 308).
5. A. Einstein, *The meaning of relativity*, Princeton University Press, Princeton, fifth edition, 1956 (pág. 1).
6. Hermann Weyl, *Raum-Zeit-Materie*, Springer, Berlín, 1970, (pág. 5). Para una discusión más detallada sobre la simetría espacio-temporal en la relatividad especial véase el artículo de la autora: "Luz, espacio-tiempo, antimateria" en la revista *Scientiae*, de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional, Bogotá, 1 (2), 1982 (págs. 117-128).

7. Austin Dobson, La paradoja del tiempo, citado por Martin Gardner en Izquierda y Derecha en el Cosmos, Salvat, Barcelona, 1986 (pág. 249).
8. A Einstein, ref. (3), pág. 511.
9. Citado por H. Reichenbach en The direction of time, Univ. of California Press, 1956 (pág. 115).
10. H. Reichenbach, ref. (9), pág. 127.
11. Landau y Lifchitz, Physique Statistique, Mir, Moscú, 1967, (pág. 44).
12. Véase, por ejemplo, el artículo de E. Joos, Phys. Rev. D, 29, 8 (1984) y referencias contenidas allí, en particular, los trabajos de D. Zeh.
13. E. Meyerson, Identity and Reality, Dover, 1962 (Pág. 425).
14. C.F. von Weizsäcker, Zum Weltbild der Physik, Hirzel, 1954, (pág. 86).
15. E. Schrödinger, Science. Theory and Man, Dover, 1957, (pág. 43).
16. Ref. (1), pág. 300.

TEORIA CUANTICA  
ALGUNAS CONSECUENCIAS FILOSOFICAS,  
CIENTIFICAS Y TECNOLOGICAS

CICLO DE CONFERENCIAS EN  
EL CENTENARIO DE

ERWIN SCHRÖDINGER  
1887 - 1963

9

*GERMAN ARENAS S. Profesor Departamento de Física, Facultad de Ciencias Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.E.- Colombia.*

## CONSECUENCIAS TECNICAS DE LA MECANICA CUANTICA

9

GERMAN ARENAS

### 1. INTRODUCCION

El nuevo aspecto fundamental de la naturaleza, descubierto en las primeras décadas del siglo y expresado en la mecánica cuántica, es la asociación de ondas con las partículas materiales. Tal idea, avanzada por De Broglie en 1924, era, muy conscientemente, una inversión de la idea de Einstein; éste había propuesto que las ondas electromagnéticas se asociarían, y no sólo en la emisión, con cuantos de luz o fotones. Tales fotones tendrían localización espacio temporal, al menos mientras interactúan con los átomos, o mejor con las superficies; pero la propagación de la luz sería como la de una onda. De Broglie propuso, entonces, la asociación de ondas para explicar el movimiento de los electrones, por ejemplo en los átomos propuestos por Bohr (sistemas solares en miniatura) y explicó, desde otro punto de vista, las regularidades encontradas en el átomo de hidrógeno. Posteriormente se ampliaría el alcance de la propuesta de De Broglie, se eliminarían las contradicciones y arbitrariedades del modelo de Bohr, en la serie de trabajos de SCHRÖDINGER y otros, que constituyeron primero el moderno modelo del átomo y posteriormente representaron la base de la mecánica cuántica. El aspecto central de las leyes cuánticas, el que nos ocupará, es, repito, la introducción de esas ondas, que permiten describir, a través del estudio de su propagación, el movimiento de las partículas constituyentes de los átomos.

Si se quiere hablar de las consecuencias o aplicaciones técnicas de la mecánica cuántica hay varias alternativas: se puede, por ejemplo, plantear que la visión cuántica del mundo conduce a las leyes físicas más generales que conocemos; diríamos entonces que todos los sistemas físicos son cuánticos y que hablar de las consecuencias de la mecánica cuántica es un tema demasiado vasto; es como si a finales del siglo XIX se preguntara por las consecuencias técnicas de las leyes de Newton o las ecuaciones de Maxwell.

Siguiendo este punto de vista, podríamos decir que toda la técnica humana está basada en propiedades cuánticas de la materia. Así, por ejemplo, la estructura cuantizada de los átomos (y la existencia de electrones) permite una comprensión mayor de fenómenos como la conductividad eléctrica, incluida la superconductividad, la termoelectricidad, los fenómenos relacionados con la constante dieléctrica, con el magnetismo, la dilatación térmica, la elasticidad, la amortiguación acústica y, finalmente, para no mencionar más que otro ejemplo, las interacciones entre la radiación y los sólidos.

Otra posibilidad sería reconocer que, si bien hasta donde hoy conocemos, todo el mundo que nos rodea obedece las leyes de la mecánica cuántica, los sistemas macroscópicos deben, correctamente, ser descritos por las "antiguas" leyes físicas clásicas. Ningún ingeniero en sus cabales pretenderá que la teoría de Newton o la de Maxwell no es adecuada para aplicaciones corrientes, por ejemplo en la construcción de caminos o de líneas de conducción de potencia eléctrica. Solo en casos muy especiales se pone de manifiesto la imposibilidad de ignorar los aspectos cuánticos en la descripción, estudio o aprovechamiento de la naturaleza.

Efectivamente, hay fenómenos "típicamente cuánticos" que encuentran aplicación extensa en la tecnología; veamos dos ejemplos: la electrónica moderna emplea semiconductores como base de los sistemas de alta integración (VLSI): la tecnología de los metales emplea herramientas de corte con base en el láser de argón. Ambas aplicaciones aprovechan, directamente, la cuantización de los estados electrónicos.

Hay además fenómenos donde las propiedades ondulatorias de los electrones se manifiestan de otra manera: el funcionamiento del simple motor eléctrico de escobillas, en el que la corriente debe pasar de un

metal (colector) a otro (escobillas) a través de dos capas de óxido y, a veces, de una de aire o plasma, involucra el paso de los electrones a través de una barrera de potencial más o menos compleja.

Este "efecto túnel", conocido experimentalmente hace más de 25 años, se explica por las propiedades ondulatorias de los electrones: las ondas, cuyo movimiento nos dirá a dónde van los electrones, arrojan cierta probabilidad, calculable por medio de la mecánica cuántica, de alcanzar el exterior de un metal: si se establece una diferencia de potencial entre dos objetos metálicos separados por una capa aislante muy delgada, por ejemplo el vacío, fluirá una corriente. La amplitud de la onda y, como consecuencia forzosa, la intensidad de la corriente "de túnel" dependen muy sensiblemente de la distancia entre los dos metales.

El carácter ondulatorio de los electrones abre además nuevas posibilidades: cuando se quiere observar un objeto cercano, es posible iluminarlo con ondas electromagnéticas en el rango en que se disponga de lámparas adecuadas. Si se lograra además realizar elementos de enfoque (físicos o numéricos), sería posible construir elementos ópticos en diferentes regiones del espectro electromagnético. Así se han realizado microscopios que trabajan desde el infrarrojo hasta el ultravioleta y se trabaja en la más difícil región de los rayos x blandos. La cuestión nueva es: ¿cuáles de las ondas-partículas se pueden emplear para "iluminar" y observar esos objetos? y además: ¿para cuáles es posible calcular el límite de resolución por medio de los conocidos criterios de Rayleigh y Abbe?

Otra perspectiva abierta es la de aplicación de la óptica a los sistemas cuantizados. En particular, la comprensión de la emisión y la absorción estimuladas de radiación por los átomos ha permitido la construcción de fuentes de radiación muy particulares; la intensidad y la coherencia de la radiación obtenida con ellas es mucho más alta que con otras fuentes: son los láseres y máseres. Se obtiene así además la posibilidad de amplificar la luz. Hace poco se han desarrollado elementos que pueden conmutar la trayectoria de la luz por medio de la aplicación de una diferencia de potencial: se especula ya con la posible construcción de un computador *fotónico*, que podría trabajar mucho más rápido que los electrónicos.

A pesar de que la lista de tan importantes logros técnicos podría alargarse, y cada uno de ellos podría merecer una discusión extensa,

considero, sin embargo, que la principal consecuencia "técnica" de la ciencia actual y, claro está, de la mecánica cuántica, tiene un aspecto eminentemente social: es el acercamiento entre quienes trabajan en la técnica de los materiales y quienes estudian sus propiedades; es el acercamiento entre la Ciencia de los Materiales y la Técnica de los Materiales. Todos los impresionantes logros técnicos de este siglo son consecuencias de este acercamiento, de este cambio fundamental en la relación entre ciencia y técnica. Consideremos brevemente como era esa relación antes y cómo es después del cambio que mencionamos:

## 2. LA CIENCIA Y LA TECNICA DE LOS MATERIALES

Durante la mayor parte de la historia humana, se han empleado los materiales como algo dado, sin considerar conscientemente su diversidad y el por qué de su adaptabilidad para diversos usos. Una causa para tal actitud podría ser el temprano descubrimiento de varios materiales, cuyas propiedades se prestaban para una amplia serie de usos sin mayor estudio. Se utilizaron poco más que piedras, arcilla quemada, cemento, materiales biológicos y las aleaciones de los "siete" metales antiguos. Con ellos se edificaron la mayor parte de los edificios, objetos utilitarios y de arte que hoy podemos admirar gracias al trabajo de los arqueólogos.

Sólo siglos más tarde se aclaró que las propiedades más interesantes de los materiales dependen mucho de la estructura de los sólidos; esas estructuras no eran consideradas por la física clásica: estaban fuera de su alcance. Tampoco existían las herramientas teóricas o experimentales para realizar estudios cuantitativos de tal estructura. En la actualidad sabemos que las propiedades de bulto y la estructura tienen una correlación; además, se ha reconocido que hay menos diferencias entre las diversas clases de materiales de las que se suponían cuando eran la base de diversas artes e industrias. Quien necesita actualmente un material con determinadas propiedades puede no sólo buscar entre los disponibles, sino también diseñarlo.

Pero esta nueva situación se da después de muchos siglos en que la técnica y la ciencia de los materiales estaban separados por una amplia brecha. Hace ya unos diez milenios descubrieron nuestros antepasados que un trozo de barro formado como un cuenco se puede endurecer al fuego y que el cuenco así quemado es impermeable y mantiene su for-

ma al ponerlo sobre un nuevo fuego de leña. Tales cambios o transformaciones, deliberadas, de un material altamente plástico en otro con propiedades nuevas fueron el comienzo de la técnica de los materiales.

Las capacidades y técnicas artesanales alcanzaron pronto un alto nivel: la obtención y la elaboración de los materiales se convirtieron en la base material de varias culturas. Lo contrario ocurrió con la ciencia de los materiales: los intentos de comprender e investigar la formación de los materiales, de estudiar por qué sus propiedades cambian a través de determinados tratamientos, se elevó sólo muy lentamente desde la pura especulación.

Apenas a fines del siglo XVIII y comienzos del XIX empezaron la física y, sobre todo la química, a apoyar a los artesanos y técnicos en sus investigaciones empíricas con teorías útiles y aparatos de medida. Esta colaboración continúa cada vez con mayor vigor en nuestro siglo. Las teorías actuales y los aparatos de medida se convierten, a nivel mundial, en un elemento esencial del progreso técnico.

El examen de los objetos descubiertos por los arqueólogos a través de modernos métodos de análisis permite descubrir la calidad de los métodos de producción y elaboración. Todo ello muestra la impresionante experiencia ganada hace ya muchos siglos. Pero por muy vastos que sean tales conocimientos sobre los materiales y los procesos, todos ellos partían de la simple experiencia. Los eruditos habían contribuido poco o nada a ellos; los alquimistas no discutían con los herreros. A pesar de que esta brecha disminuyó algo, permaneció abierta hasta el siglo XIX.

Hacia la mitad del siglo XIX se empezó a mostrar la aplicabilidad y utilidad de los conocimientos químicos, en particular de los fenómenos de oxidación, en la obtención de mejores metales, por ejemplo en los procesos Bessemer. Además el análisis químico se convirtió en una ayuda imprescindible en la elección de las materias primas. Posteriormente se introdujo el microscopio óptico al análisis de los aceros: hacia 1866 descubrió H.C. Sorby que la superficie de fractura de un acero representa un mosaico de cristales, el cual cambia con la composición y con el tratamiento térmico del metal. Semejantes observaciones de la estructura y de sus modificaciones, junto con los nuevos conocimientos acerca de la composición química, llevaron a las puertas de una comprensión más profunda acerca de la naturaleza interna de los materiales.

Poco a poco ganaron los químicos y los físicos un lugar firme en la dirección de los procesos de numerosas industrias de materias primas. En el presente siglo, y sobre todo en los últimos cuarenta años se han acumulado conocimientos básicos que hoy impulsan el desarrollo de nuevos materiales y tecnologías de proceso. Un conocimiento teórico profundo de los materiales y aparatos que abren enormes posibilidades para la investigación de los mismos han sentado las bases para una estrecha colaboración entre los científicos de los materiales y los ingenieros.

### 3. LA FÍSICA EN LA CIENCIA DE LOS MATERIALES

El aspecto estructural de la ciencia de los materiales se desarrolló con mucha lentitud. Ya en 1772 R. F. de Reaumur publicó un notable trabajo sobre el hierro, basado en cambios de estructura observados o hipotéticos en un nivel que hoy en día asociaríamos con la microestructura. En él describió experimentos que lo llevaron a encontrar un material importante, la función maleable. Pero su estilo era más bien especulativo y el rigor de la física de Newton desplazó este tipo de especulaciones estructurales hasta el fin del siglo XIX.

Los mineralogistas habían estudiado, mientras tanto, las simetrías de las formas exteriores de los cristales; la matemática de las redes cristalinas se había trabajado sin reconocer del todo la naturaleza de sus componentes. La composición molecular (más que la estructura) fue la base de la mayoría de las discusiones acerca de los sólidos, en física o en química, durante el siglo XIX. El punto de vista atomístico-estructural se impuso apenas después, como resultado de nuevas técnicas experimentales, principalmente la difracción de los rayos x.

Ahora, casi al final del siglo XX se puede entender que la principal contribución de la ciencia es la comprensión de la relación entre las propiedades externas mensurables y la estructura interna de los materiales. Se ha visto que los materiales poseen una arquitectura interna; se encuentra una jerarquía de estructuras que se construyen unas sobre otras. Sólo esa complicada arquitectura puede explicar las grandes diferencias en el comportamiento de los diferentes materiales. Visto de otro modo, el estudio cuidadoso de esas estructuras permite la predicción del comportamiento de los materiales.

Estos estudios son facilitados por una serie de nuevos aparatos y técnicas, que permiten resolver detalles cada vez más pequeños. Sorby introdujo el microscopio óptico al estudio de los granos metálicos. En este siglo siguieron los microscopios con electrones, la difracción de rayos x, los métodos espectroscópicos de emisión, la dispersión de partículas de altas energías, etc.

### 4. LA MICROSCOPIA CON ELECTRONES

El límite de resolución de todo sistema óptico depende de la longitud de onda de la radiación con la que se trabaja. A partir de los desarrollos teóricos de Abbe se sabe que con un microscopio sólo se pueden investigar estructuras, cuyas dimensiones sean no menores que la longitud de onda de la luz utilizada; esto significa, en el caso de la luz visible, un límite de unos 500 nanómetros. La observación de interferencias en la dispersión de electrones, realizada por C.J. Davisson y L.H. Germer, mostró claramente el carácter ondulatorio de los haces de electrones.

Cuando se sumaron estos descubrimientos a la técnica que permite enfocar y desviar haces de electrones (que nada tenía en común con sus propiedades ondulatorias) se abrió el campo hacía la construcción de instrumentos capaces de ir más allá de los límites del microscopio, por medio de la "iluminación" con electrones. Hacia el primer tercio de este siglo se trabajaba aún con el concepto heredado del microscopio con luz: la iluminación debe atravesar la muestra y se debe elaborar por medio de lentes de corta distancia focal, para obtener imágenes agrandadas.

La invención del microscopio electrónico es, sin duda, uno de los más importantes logros de este siglo. Se utiliza en la investigación de estructuras en la ciencia y la técnica de los materiales, en la biología y la medicina. Como es natural, la microscopía electrónica actual difiere mucho de los primeros intentos: un instrumento actual es el resultado del desarrollo tecnológico y de la experiencia de grandes equipos de trabajo durante varias décadas. Vale la pena recordar que parte del Premio Nobel en Física de 1986 fue concedido por los trabajos prácticos y teóricos que condujeron a la construcción de los primeros microscopios electrónicos.

Un importante desarrollo posterior fue la microscopia de barrido, en la que un haz de electrones, de unos 10 nanómetros de diámetro se mueve sobre la muestra. Se obtiene con ello una señal que depende de la topografía o de la composición de la muestra, por ejemplo, a través de la intensidad de electrones secundarios, lo que permite lograr una imagen. También es importante el microscopio electrónico de efecto de campo, en el que los electrones, que salen de una punta de un sólido debido a la presencia de un alto campo eléctrico, crean una imagen muy agrandada de la punta.

Con este último y, sobre todo, con el microscopio iónico de efecto de campo, se puede estudiar la topografía de una superficie con resolución de la estructura atómica. Por el contrario, el haz de un microscopio electrónico de transmisión penetra profundamente en la materia y es, por ello, más bien insensible a estructuras finas de la superficie. La desventaja de todos estos instrumentos está ligada con su principio de funcionamiento: los microscopios de efecto de campo se pueden emplear sólo con muestras estables en fuertes campos eléctricos y deben situarse en la punta de una aguja, cuyo diámetro es de algunas decenas de nanómetros. En los microscopios de transmisión y de barrido se debe trabajar con muestras estables frente al bombardeo con electrones. Todo ellos requieren trabajar en vacío, para permitir el movimiento de partículas "libres", lo que complica considerablemente la preparación de muchas muestras.

Recientemente se ha mostrado la posibilidad de evitar tales dificultades; se trata de eliminar las partículas "libres": no se requiere ninguna fuente de luz o de electrones. Se utilizarán los electrones ligados en los mismos cuerpos condensados, para investigar su superficie. Por sus trabajos recibieron G. Binnig y H. Rohrer otra parte del Premio Nobel de 1986. Aunque la tecnología dista mucho de ser sencilla, ha sido posible mostrar que se puede mover una punta metálica frente a una superficie, siguiendo los contornos con una resolución (en vacío) equivalente a las distancias atómicas. Para ello se utiliza la corriente de túnel como medida de la distancia entre la punta y la superficie; los movimientos muy finos de la aguja se gobiernan por medio de barras piezoeléctricas y una electrónica precisa. Para dar una idea del grado de tecnología necesario se puede mencionar que para tener una resolución de 0.2 nanómetros en la dirección horizontal, es necesario que la aguja sensora (producida por abrasión con un haz iónico) tenga un sólo átomo en la punta. Ade-

más tal resolución se obtendría sólo en el vacío. En un medio líquido la resolución resultaría mucho más modesta, unos cuantos nanómetros; pero la ventaja que ofrece, en cuanto a la facilidad de preparación de las muestras y a la posibilidad de estudiar por fin muestras como células vivas, abre inmensas posibilidades para la investigación en todo el mundo.

El desarrollo progresivo y el éxito de las teorías y de las técnicas experimentales condujeron finalmente al estudio de la más notoria perturbación de los cuerpos sólidos: las superficies. Con ello han sido posibles avances importantes en campos como la catálisis, la utilización de superficies semiconductoras, por ejemplo en sensores sólidos, estudios de fractografía, etc. Para realizarlos se han desarrollado técnicas que no sólo permiten estudios topográficos, sino de composición, como la espectroscopia de foto-electrones, el análisis y la microscopia con electrones Auger, la espectroscopia de iones secundarios, la difracción de electrones lentos o rápidos, etc. en Todas ellas no sólo las técnicas experimentales, como la del vacío ultraalto han sido decisivas, sino una comprensión cada vez mayor de los aspectos teóricos involucrados en la Física de las superficies. El dominio de la Ciencia de las Superficies ayuda ya al desarrollo de la Técnica de Superficies.

## 5. TAREAS ACTUALES. A MODO DE CONCLUSION

Las consideraciones anteriores muestran la enorme potencialidad que encierra el impulso de la Ciencia para el desarrollo de la Técnica, de la producción y de la economía en general. Si interpretamos adecuadamente la historia, una moraleja sería: resulta sumamente miope la tendencia a desarrollar otros campos del saber en detrimento de la ciencia; sería casi un suicidio nacional. Es indispensable que, dentro de una estrategia de desarrollo nacional, se impulse la Física como una necesidad de la industria nacional. No se quiere decir con ello, obligatoriamente, la imitación o la repetición de las investigaciones que representan "las fronteras de la ciencia". El cierre de la brecha entre la ciencia y la producción que aún subsiste en nuestro país requiere que dominemos varios conocimientos que de ninguna manera son simples redescubrimientos; son conocimientos genuinamente nuevos y, lo que tal vez sea más importante, una nueva relación de trabajo entre los científicos y los industriales. Si además creemos que todo avance en la pro-

ducción y un mayor grado de independencia representa, a mediano o largo plazo una ventaja para todas las clases de una sociedad, podremos tener confianza en que nuestro trabajo, en últimas, contribuirá positivamente al futuro de nuestro país. En resumen, gracias a la Ciencia del siglo XX y en particular a los conocimientos sobre las propiedades *cuánticas* de la materia, las posibilidades de trabajo en la investigación se pueden acercar cada vez más a las necesidades del desarrollo nacional. Como aprovechemos esas posibilidades depende ahora, en buena parte, de nosotros mismos.

### BIBLIOGRAFIA

- Aitchinson, L.; A History of Metals, Interscience Publishers, 1960.
- Alexander, W., Street, A.; Metals in the Service of Man, Penguin Books, 1964.
- Burstall, A.F.; A History of Mechanical Engineering, The M.I.T. Press, 1965.
- Jastrzebski, Z.D.; The Nature and Properties of Engineering Materials, John Wiley & Sons, 1977.
- Mumford, L.: Técnica y Civilización, Alianza Universidad, 1971.
- Smith, C.S.; Materials and the Development of Civilisation and Science, en Science, 148, 908 (1962).
- Smith, C.S.; Materials, en Scientific American, 217, 68. (1967).
- Sze, S.M.; Physics of Semiconductor Devices, John Wiley & Sons, 1969.
- Ziman, J.M.; Principles of the Theory of Solids, Cambridge University Press, 1964.
- Ziman, J.M.; Electrons and Phonons, Oxford University Press, 1960.

TEORIA CUANTICA  
ALGUNAS CONSECUENCIAS FILOSOFICAS,  
CIENTIFICAS Y TECNOLOGICAS

CICLO DE CONFERENCIAS EN  
EL CENTENARIO DE

ERWIN SCHRÖDINGER  
1887 - 1963

10

*EFRAIN BARBOSA R. Profesor Departamento de Física, Facultad de Ciencias Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.E., - Colombia.*

## EL ATOMO DE HIDROGENO DESDE SCHRÖDINGER HASTA EL PRESENTE

10

*EFRAIN BARBOSA R.*

### RESUMEN

En este trabajo se presentan algunos desarrollos que han tenido lugar en el estudio de la estructura del átomo de hidrógeno desde SCHRODINGER hasta el presente. Se dan ejemplos de diferentes aproximaciones que se han hecho y se indica que todavía se pueden obtener nuevos resultados de las investigaciones actuales sobre el átomo de hidrógeno.

### 1. ANTES DE SCHRÖDINGER

Podemos afirmar que la historia del átomo de hidrógeno se inicia en la antigua Grecia con la concepción del atomismo por parte de Leucipo, Demócrito y Empédocles. Tal vez sin temor a equivocarnos, es muy probable que nuestras imágenes mentales acerca de los quarks coincidan con las de los antiguos griegos acerca de los átomos. Si el sistema de quarks que hoy se acepta como válido no se modifica sustancialmente a mediano plazo, es seguro que los físicos de altas energías comenzarán a investigar la estructura interna de los quarks.

Sin lugar a dudas uno de los mayores avances en la evolución de las ideas acerca de la estructura atómica se produjo con la publicación de Boyle titulada "El químico escéptico", en la cual se trazó un programa

sistemático que condujo al establecimiento definitivo de la Química como una de las ciencias naturales fundamentales.

El punto culminante en la verificación experimental de la hipótesis de que la materia está constituida por átomos indivisibles se alcanzó cuando Dalton explicó denominadas leyes ponderales de la Química.

Muchísimas otras personas tales como Mendelyev, Thomson, Bernoulli, Rutherford y sus colaboradores Geiger y Marsden, Fraunhofer, Angstrom, Balmer, Rydberg, Planck, Einstein, Bohr, De Broglie, Sommerfeld, y otros contribuyeron a la evolución de las ideas acerca de la estructura de los átomos que se tenía en los primeros años del presente siglo.

## 2. LA ECUACION DE SCHRODINGER PARA EL ATOMO DE HIDROGENO

SCHRÖDINGER resolvió la ecuación que ahora lleva su nombre para el átomo de hidrógeno como un problema de valores propios<sup>1</sup>, habiendo encontrado como valores propios del operador hamiltoniano los valores de energía que ya había predicho el modelo sencillo de Bohr.

El hamiltoniano de SCHRÖDINGER tan sólo contiene el término de interacción de Coulomb entre el protón y el electrón. Sin embargo el progreso que en 1926 se había hecho experimentalmente para la determinación de los niveles de energía no sólo del átomo de hidrógeno, sino de otros elementos químicos, ya era tal que permitía medir las llamadas estructuras fina e hiperfina de las líneas espectrales producidas por la luz que emiten los átomos. Es muy notable el hecho de que Sommerfeld, sin utilizar la teoría ondulatoria de Schrödinger, había calculado correcciones relativistas a los niveles predichos por el modelo sencillo de Bohr, que permitían inferir claramente que la estructura fina de los espectros atómicos se debe a un efecto relativista. Sorprendentemente los resultados son idénticos a los de una teoría ondulatoria y relativista.

La falla más importante que parecía tener la teoría de Schrödinger, era que no tenía en cuenta para nada algún posible efecto proveniente de la teoría de la relatividad. A primera vista pudo haber parecido una falta grave, pero en realidad no lo fue, pues ciertamente no era nada sencillo incluir en sus trabajos los requerimientos teóricos de la relatividad especial.

Hoy en día podemos decir que si SCHRÖDINGER buscaba la inmortalidad de su nombre, fue un acto de genialidad de su parte, haber dejado de lado todas las consideraciones relativistas. Con toda seguridad las palabras "ecuación de Schrödinger" serán pronunciadas, por lo menos en el futuro próximo cercano, con una frecuencia muchísimo mayor que todas las otras ecuaciones que le han seguido y le seguirán.

La ecuación de SCHRÖDINGER para el átomo de hidrógeno se escribe sencillamente como:

$$\mathcal{H}\psi = E_n\psi$$

donde

$$\mathcal{H} = -\frac{\hbar^2 \nabla^2}{2m} + V(r) \quad \text{y} \quad V(r) = -\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

Las soluciones de esta ecuación se encuentran en casi todos los cursos de Física Moderna o de Física Cuántica.

## 3. ESPECTRO DEL ATOMO DE HIDROGENO

Las transiciones entre los distintos niveles del espectro de energía del átomo de hidrógeno dan lugar a la emisión de radiación electromagnética que se observa experimentalmente como líneas espectrales en las diferentes regiones del espectro: infrarroja, visible y ultravioleta.

Leamos lo que dicen Hänsch, Schawlow y Series<sup>2</sup> acerca de la importancia del espectro del átomo de hidrógeno en la Física:

"El espectro del hidrógeno ha demostrado ser la piedra de toque de la Física Moderna: una vez que se haya descifrado este patrón de líneas, también se habrá entendido mucho más. Lo más importante es que en gran parte fueron los esfuerzos por explicar este espectro los que inspiraron las leyes de la mecánica cuántica. Se ha encontrado que estas leyes no sólo se aplican a este átomo tan sencillo sino a otros átomos, a moléculas y a la materia macroscópica. Estas leyes constituyen el fundamento último de la Química moderna, el Estado Sólido y aún de las ciencias aplicadas tales como la Electrónica".

#### 4. CORRECCIONES RELATIVISTAS A LA ECUACION DE SCHRÖDINGER PARA EL ATOMO DE HIDROGENO

Las correcciones relativistas a la ecuación de Schrödinger para el átomo de hidrógeno se pueden introducir como hamiltonianos de perturbación pues estos operadores tienen un efecto bastante pequeño.

La corrección de spin-órbita está representada por el hamiltoniano

$$H_1 = - \frac{e}{2m^2 c^2} \frac{1}{r} \frac{dV}{dr} (\vec{L} \cdot \vec{s})$$

mientras que la corrección de momentum está representada por

$$H_p = p^4 / 8m^2 c^2$$

A partir de estos dos hamiltonianos perturbativos los valores propios de la energía se modifican dando términos adicionales a los de Bohr

$$E_{nj} = - \frac{\alpha^2 z^2 mc^2}{2n^2} \left[ 1 + \frac{2z^2}{n} \left( \frac{1}{j + 1/2} - \frac{3}{4n} \right) \right]$$

donde  $\alpha = e^2 / 4\pi\epsilon_0 \hbar c \approx 1/137$ .

Aquí ya es digno de mencionarse que Dirac pudo obtener un resultado que contiene al anterior como una aproximación, incluyendo desde el comienzo en el planteamiento del operador hamiltoniano la teoría de la relatividad especial.

El operador hamiltoniano utilizado por Dirac es

$$H = c \vec{\alpha} \cdot \vec{p} + \beta mc^2 + V(r)$$

siendo  $\vec{\alpha}$  y  $\vec{\beta}$  operadores matriciales que se expresan en términos de las matrices de Pauli  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$

$$\vec{\alpha} = \begin{pmatrix} 0 & \vec{\sigma} \\ \vec{\sigma} & 0 \end{pmatrix} \quad \beta = \begin{pmatrix} I_2 & 0 \\ 0 & -I_2 \end{pmatrix}$$

$$\sigma_x = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad \sigma_y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}$$

$$\sigma_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \quad I_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

#### 5. ESTRUCTURA DE LAS LINEAS ESPECTRALES

Ahora pasemos a examinar hechos experimentales que posiblemente no fueron analizados por el científico a quien con este ciclo de conferencias rendimos homenaje en el centenario de su nacimiento, el gran físico vienés ERWIN SCHRÖDINGER. Indiscutiblemente la ecuación de Schrödinger es la ecuación fundamental que constituyó el eje central alrededor del cual gira toda la Física Cuántica. Exageradamente se podría decir que la ecuación de Dirac no es más que una extensión relativista de la ecuación de SCHRÖDINGER y que la gran mayoría de los físicos después de SCHRÖDINGER, se han dedicado exclusivamente a resolver esta ecuación por distintos métodos de aproximación y a comparar las soluciones con resultados experimentales.

Un análisis detallado de los niveles de energía predichos por la teoría mecanocuántica relativista de Dirac, nos muestra que la línea roja de Balmer H-alfa en realidad debe estar compuesta de cinco líneas correspondientes a longitudes de onda muy cercanas entre sí.

Las diferencias entre los niveles de energía dados por la teoría relativista de Dirac, la cual parece ser la más correcta hasta este punto, es demasiado pequeña. La diferencia medida en longitudes de onda es del orden de  $0,2 \times 10^{-10}$  m lo cual implica que debemos ser capaces de medir las longitudes de onda con un poder de resolución de más de una parte en 10000.

Una resolución de una parte en 10000 no es exótica ni siquiera para espectroscopistas del siglo pasado como los franceses Fabry y Perot, o el norteamericano Michelson, quienes con sus interferómetros lograron resoluciones de una parte en un millón.

Con los instrumentos anteriores es posible en principio comparar dos longitudes de onda diferentes que difieren en una cantidad muy pequeña. Sin embargo hay una razón por la cual no se puede verificar

directamente la existencia de líneas separadas como la que predice la fórmula aproximada de Dirac, y es que los átomos a una temperatura ambiente o superior, se mueven y por lo tanto la luz que emiten presenta un corrimiento en la frecuencia por efecto Doppler.

El efecto Doppler ocasiona que las líneas observadas no sean muy definidas, sino que por muy grande que sea la resolución de nuestros instrumentos espectroscópicos, siempre observaremos una curva gaussiana debida a la distribución maxwelliana de velocidades que tiene un gas a la temperatura ambiente.

A los buenos físicos casi siempre se les ocurre las cosas más sencillas, y como el ancho de las líneas es proporcional a la temperatura, lo primero que hicieron fue estudiar la emisión de la luz por parte del átomo de hidrógeno a bajas temperaturas. Aunque los experimentos enfriando el hidrógeno con aire líquido se iniciaron en 1925, tan solo en 1938 el grupo de Williams<sup>3</sup> pudo llegar a resolver tres de las cinco líneas que predecía la teoría de Dirac.

Aparentemente la teoría de Dirac iba a ser confirmada plenamente con estos experimentos, y entonces por lo menos momentáneamente ya no serían necesarias más correcciones en el operador hamiltoniano. Sin embargo el resultado experimental mostró que una de las líneas, la central y más débil, no estaba en la posición correcta. Williams y sus colaboradores Drinkwater y Richardson explicaron en un artículo de 1940<sup>4</sup> que sólo era posible una de las dos situaciones siguientes:

1. El experimento tenía una complicación oculta. 2. El modelo teórico en el marco de la ecuación de Dirac no era suficiente para dar cuenta de los hechos experimentales.

Lamb y Retherfor aceptaron la hipótesis de que debería haber algún otro efecto que no estaba incluido en el hamiltoniano de Dirac y diseñaron un experimento con el fin de probar esta hipótesis en el año de 1947. Este experimento ha venido a convertirse en uno de los experimentos más importantes de la Física Moderna.

El resultado del experimento de Lamb y Retherford<sup>5</sup>, mostró con toda claridad que la teoría relativista de Dirac no era más que una nueva aproximación para el cálculo de los niveles de energía del átomo de hidrógeno. Esto constituyó una motivación muy grande para que los físicos teóricos después de la segunda guerra mundial enfocaran sus esfuerzos hacia el desarrollo de una teoría cuántica de las interacciones electromagnéticas.

## 6. ESPECTROSCOPIA LASER

Schawlow, uno de los inventores del láser dijo que el láser es una solución en busca de problemas y tenía razón. En efecto, la espectroscopia fue uno de esos problemas que encontró el láser. La espectroscopia óptica experimentó un "renaissance" con el advenimiento de todos los diversos tipos de láseres en una gran parte del espectro electromagnético. En especial la región visible del espectro se benefició del empleo de fuentes de radiación sintonizables, como los láseres de colorantes que se pueden sintonizar no sólo en rangos relativamente grandes sino también en rangos muy pequeños.

Los trabajos experimentales de Szoke, Javan, MacFarlane, Bennet y Lamb<sup>6-7</sup>, no solo permitieron el desarrollo de una teoría de láser por parte del mismo Lamb<sup>8</sup>, sino también el desarrollo de una primera técnica de espectroscopia láser que permitía la observación de niveles de energía que estuvieran separados por un ancho menor que el ensanchamiento Doppler de las líneas espectrales. En esencia la técnica consiste en "marcar" los átomos que se mueven con una cierta velocidad (o por lo menos con una cierta velocidad dentro de un rango suficientemente pequeño) para que se puedan distinguir en el espectro de la luz emitida, dos líneas muy cercanas.

Hänsch y sus colaboradores<sup>9</sup> en 1971, utilizaron exitosamente un montaje experimental relativamente sencillo. Ellos pudieron obtener un espectro de absorción con una resolución que sobrepasa las limitaciones impuestas por el ensanchamiento Doppler de las líneas espectrales y dando lugar al campo de la Física que se conoce con el nombre de espectroscopia láser de altísima resolución (very high resolution laser spectroscopy).

Las resoluciones que permiten los dispositivos construidos utilizando como fuentes de luz láseres modernos, van más allá de las resoluciones que tenían todos los antiguos aparatos espectroscópicos. Se han alcanzado resoluciones que van desde una parte en un millón hasta una parte en un billón ( $10^{12}$ ). Sin embargo los físicos siempre están insatisfechos con sus instrumentos y siempre los quieren seguir mejorando; así que casi con toda seguridad tendremos espectrómetros láser o de alguna otra tecnología con resoluciones insospechadas.

¿Será posible sobrepasar algún día la limitación del ancho natural de las líneas espectrales impuesta por la relación de incertidumbre mecanocuántica?

Yo espero que la respuesta a esta pregunta sea positiva pues muy probablemente podremos observar efectos nuevos que nos permitan hacernos imágenes mentales cada vez más y más precisas del mundo en el que vivimos.

Vale la pena mencionar que las técnicas de espectroscopia láser obviamente se pueden aplicar en el estudio de espectros de baja resolución y hoy no sólo son parte integrante de la Analítica química, sino que han llevado a la obsolescencia completa a otras técnicas antiguas.

### 7. ESTRUCTURA FINA DEL ESPECTRO DEL ATOMO DE HIDROGENO

Casi inmediatamente después de descubierta la denominada espectroscopia de saturación de altísima resolución, que como se dijo anteriormente consiste en "marcar" los átomos con una cierta velocidad por medio de la absorción de luz de un haz saturante y luego midiendo la absorción de un haz de prueba, Hänsch se dió a la tarea de estudiar el espectro del átomo de hidrógeno. En particular se propuso estudiar el espectro de estructura fina de la línea roja de Balmer H-alfa, la cual incluyendo correcciones electrodinámicas a la ecuación de Dirac debe estar formada por siete líneas. Hänsch encontró un resultado que confirma con gran precisión muchos de los resultados de la Electrodinámica Cuántica.

Poco tiempo después Hänsch con otros colaboradores mejoró la técnica utilizando luz polarizada circularmente con lo cual el ruido experimental es mucho menor y la resolución mejora algo. De esta forma les fue posible obtener un valor más preciso de la constante de Rydberg. También les fue posible hacer verificaciones de las predicciones de la electrodinámica cuántica con una precisión antes insospechada en la espectroscopia óptica clásica.

En 1970 Vasilenko, Chebotayev y Shishaev<sup>10</sup> sugirieron la técnica que se conoce con el nombre de espectroscopía de dos fotones con la cual se pueden obtener espectros de altísima resolución. Lee, Wieman y otros, bajo la dirección de Hänsch, pudieron obtener con este método la línea de Lyman-alfa con el fin de determinar el corrimiento de Lamb del estado fundamental  $1S_{1/2}$ .

### 8. ESTRUCTURA HIPERFINA DEL ATOMO DE HIDROGENO

Si se tiene en cuenta la interacción entre los momentos de dipolo magnético que poseen tanto el electrón como el protón, se obtiene una estructura en el espectro que es aún mucho más fina y por eso se denomina hiperfina. Para los dos estados del hidrógeno que corresponden a los valores de  $F = 0$  y  $F = 1$  siendo  $F$  el número cuántico correspondiente al spin total = spin nuclear + spin electrónico, la diferencia entre los niveles de energía está dada por  $5,88 \times 10^{-6}$  eV, que corresponde a una longitud de onda de 21 cm.

El momento magnético del protón se puede determinar por métodos de resonancia magnética nuclear, de manera que midiendo con suficiente precisión la frecuencia de la radiación absorbida o emitida por un átomo de hidrógeno al hacer una transición entre estos dos estados, es posible obtener con gran precisión un valor para el momento magnético asociado con el spin del electrón. El valor de este momento magnético difiere del valor predicho por la teoría de Dirac. En los últimos cuarenta años muchos físicos se han dedicado con empeño a la labor de calcular con la mayor exactitud el valor del momento magnético del electrón teniendo en cuenta detalladamente la interacción entre la radiación y la materia. Este es uno de los números que la Electrodinámica Cuántica debe ser capaz de calcular.

### 9. EL ATOMO DE HIDROGENO Y LA ASTROFISICA

La línea espectral de 21 cm. de longitud de onda ha resultado ser muy importante para determinar características de la estructura galáctica. En el espacio interestelar hay una densidad muy baja de átomos de hidrógeno, pero debido a lo gigantesco del espacio hay en últimas muchísimos átomos los cuales deben ser en efecto capaces de emitir y absorber esta radiación de 21 cm. Se sabe que en la Vía Láctea hay muchos de estos átomos. Por medio de radiotelescopios se puede estudiar el movimiento de las partículas de la Vía Láctea, el cual se manifiesta por el efecto Doppler en la radiación detectada.

Así es como los astrofísicos han demostrado espectacularmente el carácter de espiral nebulosa de la Vía Láctea.

## 10. EL ATOMO DE HIDROGENO EN EL FUTURO

El átomo de hidrógeno ha sido el centro de atención de los físicos por cerca de casi un siglo. Sin embargo según lo mencionado por Hänsch, Schawlow y Series<sup>9</sup>, la información que se puede extraer de un sistema de partículas tan sencillo como este todavía no se agota. Hay teorías unificadas de los campos tales como las de Steven Weinberg y las de Abdus Salam, las cuales predicen efectos muy sutiles en el hidrógeno y otros átomos. Estos efectos tal vez pueden ser observados como cambios muy pequeños en la polarización de la luz que es emitida o absorbida. Actualmente en el mundo entero hay grupos activos trabajando en este campo.

Afirman los mismos tres autores mencionados en el párrafo anterior, que con la evolución de la tecnología de las fuentes de luz coherente se puede predecir sin vacilación que la investigación del espectro del átomo de hidrógeno se continuará por varias décadas.

Para terminar quiero resaltar lo expresado al final del artículo (1):

En las investigaciones futuras del espectro de la radiación emitida o absorbida por el átomo de hidrógeno se espera encontrar sorpresas, aunque también la mayor sorpresa podría ser que no se encontrara nada.

### REFERENCIAS

1. E. Schrödinger, Ann. de. Physik, 79, 361 (1926).
2. T. W. Hänsch, A.L. Schawlow, G.W. Series, Sci. Am. 240, 94 (1979).
3. W.E. Williams, Phys. Rev., 54, 558 (1938).
4. Drinkwater, Richardson, and W. E. Williams, Proc. Roy. Soc., 174, 164 (1940).
5. W. E. Lamb, Jr., R.C. Retherford, Phys. Rev., 72, 241 (1947).
6. A. Szoke, A. Javan, Phys. Rev. Lett., 10, 521 (1963).
7. R.A. MacFarlane, W.R. Bennet, W.E. Lamb, Jr., Appl. Phys. Lett., 2, 189 (1963).
8. W.E. Lamb, Jr., Phys. Rev. 134 A, 1429 (1964).
9. T.W. Hänsch, M.D. Levenson, A.L. Schawlow, Phys. Rev. Lett. 26, 946 (1971).
10. L. S. Vasilenko, V.P. Chebotaev, A.V. Shishaev, JEPT Lett. 12, 113 (1970).

TEORIA CUANTICA  
ALGUNAS CONSECUENCIAS FILOSOFICAS,  
CIENTIFICAS Y TECNOLOGICAS

CICLO DE CONFERENCIAS EN  
EL CENTENARIO DE

ERWIN SCHRÖDINGER  
1887 - 1963

11

*DIOGENES CAMPOS R. Profesor Grupo de Física Teórica  
Departamento de Física Facultad de Ciencias Universidad  
Nacional de Colombia, Bogotá, D.E. - Colombia.*

# FISICA TEORICA Y METODO CIENTIFICO

11

*DIOGENES CAMPOS R*

## RESUMEN

Este trabajo versa sobre el método científico, en lo que a la física se refiere; sobre el papel de la creatividad, la deducción y los experimentos en la formulación de las leyes naturales; sobre las teorías físicas como modelos físico-matemáticos de la naturaleza. Se discute lo que es la física teórica y lo que hacen los físicos teóricos en su quehacer científico. Para ilustración y clarificación de las afirmaciones se toman ejemplos extraídos de la historia de la física o de las teorías físicas vigentes.

## 1. INTRODUCCION

El presente trabajo ha sido preparado con motivo del centenario del nacimiento del físico austriaco ERWIN SCHRÖDINGER (1887), cofundador de la mecánica cuántica. Su obra de naturaleza teórica desempeña un papel fundamental en la descripción y entendimiento de fenómenos naturales que ocurren a nivel microscópico (en el dominio atómico, molecular y subatómico), los cuales determinan en gran parte las propiedades físicas de los sistemas macroscópicos. La mecánica cuántica es una compleja teoría físico-matemática del dominio atómico, en la cual se basan muchas aplicaciones tecnológicas modernas. Ella permite entender y explicar las propiedades de los metales semiconductores, el láser, las reacciones químicas y muchos sistemas más. Las consecuencias filosóficas de la mecánica cuántica son trascendentales, siendo objeto aún de permanentes debates.

La mecánica newtoniana, la teoría electromagnética, la relatividad especial, la mecánica cuántica son teorías físicas consolidadas, las cuales han surgido en la evolución de la ciencia como frutos del método científico. Es objetivo del presente trabajo referirse a este método, en especial en lo concerniente a las ciencias físicas y al trabajo del físico teórico. El artículo está dirigido a un público no especializado, interesado en la naturaleza de la empresa científica: la forma como surgen, se consolidan y aceptan las leyes de la naturaleza; las relaciones entre teorías, predicciones y mediciones.

## 2. INVENTARIO DE TEORIAS FISICAS

Un objetivo de la ciencia es descubrir "leyes de la naturaleza" con el fin de explicar mediante ellas los fenómenos naturales. En la búsqueda de estas leyes la física hace uso del método científico, el cual —tal como lo entendemos hoy en día— se inició con Galileo (1564 - 1642). Como fruto de este método han surgido diversas teorías físicas, cada una con su propio dominio de aplicabilidad; entrelazadas las unas con las otras. El objetivo de esta sección es presentar al lector un panorama general, aunque necesariamente incompleto, del surgimiento de las principales teorías físicas vigentes en nuestro tiempo.

A finales del siglo XIX, la mecánica newtoniana, la teoría electromagnética, la termodinámica eran teorías físicas consolidadas. Con la obra de Newton (1642 - 1727) se identifica por primera vez una de las interacciones fundamentales de la naturaleza, *la gravitación*, y se presenta para ella una teoría matemática precisa que permite hacer afirmaciones sobre los fenómenos naturales. La estructura discontinua de la materia (esto es, el concepto de masas puntuales) desempeña un papel central.

La mecánica newtoniana falló en sus intentos de explicar los fenómenos eléctricos y ópticos; la polarización, difracción e interferencia de la luz; al igual que los fenómenos electrodinámicos. Maxwell (1831 - 1879) con su teoría del campo electromagnético realiza una espectacular unificación en que se pone en evidencia que óptica, electricidad y magnetismo son tres aspectos diferentes de un mismo fenómeno natural: el electromagnetismo. Se descubre así una segunda interacción fundamental de la naturaleza, *la interacción electromagnética*, y se introduce el concepto de campo electromagnético.

Nuevos resultados experimentales (radiación del cuerpo negro, efecto fotoeléctrico, espectros de emisión atómicos, experimento de Michelson-Morley, etc.), inexplicables mediante la mecánica Newtoniana o la teoría electromagnética, condujeron a comienzos del presente siglo al desarrollo de las dos teorías que constituyen los cimientos de la física moderna: *la teoría especial de la relatividad y la mecánica cuántica*. La primera, publicada por Einstein en 1905, revoluciona los conceptos de espacio y tiempo, los cuales dejan de ser cantidades absolutas para convertirse en cantidades relativas e interdependientes. La segunda desarrollada por SCHRÖDINGER, Dirac, Heisenberg, Pauli - introduce profundas modificaciones sobre la manera de describir los fenómenos físicos. Como dice Einstein, "las magnitudes que figuran en las leyes de la teoría cuántica no pretenden describir la misma realidad física sino tan sólo las probabilidades de que se produzca una determinada realidad".

El desarrollo de la física teórica continúa en 1916 con la *teoría general de la relatividad*, debida a Einstein, y en 1928 con la *mecánica cuántica relativista* para electrones, formulada por Dirac. Estas teorías continúan el esquema de pensamiento introducido por Einstein en la relatividad especial, el cual ha enriquecido profundamente la física y el método científico: las teorías físicas deben construirse sobre grandes principios generales de la naturaleza y no a partir de datos obtenidos en sistemas físicos particulares.

A principios del presente siglo se descubrieron adicionalmente dos interacciones fundamentales de la naturaleza (ya se conocían la gravitacional y la electromagnética): la interacción débil, responsable por la desintegración beta de algunos núcleos atómicos, y la interacción fuerte, responsable por mantener unidos los protones y neutrones en un núcleo atómico. En la Tabla 1 se comparan las cuatro fuerzas unas con otras.

Tipo de Interacción	Intensidad relativa	Alcance
fuerte	1	$10^{-15}$ m
electromagnética	$10^{-2}$	$\infty (\approx \frac{1}{r^2})$
débil	$10^{-14}$	$10^{-15}$ m
gravitacional	$10^{-40}$	$\infty (\approx \frac{1}{r^2})$

Tabla - 1. Comparación relativa de las cuatro interacciones fundamentales conocidas, en lo referente a su intensidad y su alcance.

El conocimiento de la existencia de cuatro interacciones (o fuerzas) fundamentales, hace plantear dentro de la física preguntas referentes a la posibilidad de unificarlas y obtener una formulación teórica a partir de la cual se puedan derivar las leyes ya conocidas. Con esta idea en mente la física teórica ha evolucionado en el presente siglo hasta alcanzar lo que hoy en día se conoce como *teoría cuántica de campos*. Esta teoría es un formalismo general que, en principio, puede aplicarse a las cuatro interacciones fundamentales conocidas: gravitacional, electromagnética, fuerte, débil. Desafortunadamente, la gravitación no ha podido ser incluida en el proceso unificador. Para satisfacer este objetivo son hoy en día objeto de análisis y de revisión las denominadas *teorías generalizadas de la supergravidad* basadas sobre un espacio-tiempo de 10 o más dimensiones.

### 3. ¿POR QUE UNA NUEVA TEORIA FISICA?

El inventario realizado en la sección anterior pone de manifiesto la existencia de diversas teorías físicas que van más allá de las usualmente conocidas por el público no especializado. Es lógico preguntarnos ahora sobre el papel que el método científico ha desempeñado en el surgimiento y consolidación de las diversas teorías, al igual que en la supresión de muchas otras.

La necesidad de una nueva teoría física surge por la existencia de unos pocos hechos experimentales que no puedan ser explicados con la teoría física existente o que se encuentran en conflicto con ella. Como dice Kuznetzov (1977) "Para que surja la necesidad de creación de cualquier nueva teoría es necesario el descubrimiento de *hechos* que no puedan ser explicados con el sistema teórico anterior y que se opongan a él. Estos hechos que aparecen inicialmente como aislados, separados entre sí, pueden ser, como es obvio, muy escasos. Pero deben portar carácter esencial y aparecer un conflicto con las posiciones fundamentales de la teoría anterior". Los hechos experimentales inexplicables constituyen la *base empírica* que origina una nueva teoría física.

La base empírica utilizada por Newton está constituida por las tres leyes de Kepler referentes al movimiento de los planetas alrededor del sol; mientras que la de la teoría electromagnética de Maxwell se fundamenta en las leyes de Coulomb, Gauss, Ampere, Faraday, conservación

de la carga. Los problemas de comienzos de siglo asociados con la radiación del cuerpo negro, el efecto fotoeléctrico, los espectros de emisión atómicos, el experimento de colisiones de Franck y Hertz, la difracción de ondas de materia en los experimentos de Davidsson y Germer, la imposibilidad de medir simultáneamente la posición  $\delta$  y el momentum  $\rho$  de una partícula atómica, constituyen la base empírica de la mecánica cuántica.

Los intentos fallidos por medir la velocidad absoluta de la tierra (experimento de Michelson-Morley) constituyen la base empírica que induce a Einstein a elevar el principio de la relatividad a nivel de postulado. La teoría de la relatividad general se basa en la igualdad numérica entre la masa inercial y la masa gravitacional, un hecho verificado originalmente en el siglo XIX.

### 4. LA CREATIVIDAD EN LA FISICA

A partir de una base empírica dada (antigua o nueva), la tarea fundamental de la física consiste en formular una teoría de un rango de aplicabilidad lo más amplio posible, que involucre un conjunto de leyes elementales y universales, llamadas leyes de la naturaleza, aptas para describir mediante un proceso puramente deductivo los acontecimientos observados. Como dice Einstein, "El método del teórico significa partir de la base de postulados generales o –principios– para deducir de ellos conclusiones". Sólo las conclusiones, generales o particulares, son susceptibles de una confrontación con resultados experimentales y deciden sobre el mérito de los postulados introducidos.

La Figura -1 es un organismo que sirve para ilustrar lo que es el método científico y la manera como se han generado las teorías conocidas hoy en día. La figura hace referencia a la empresa científica como un todo, al mecanismo colectivo que ha permitido el desarrollo de teorías físicas. No se debe entender como un manual de procedimiento para hacer investigación.

El problema de introducir postulados que sirvan como cimientos para una teoría física no es nada trivial. El desarrollo de las ideas está condicionado por particularidades sociales, políticas, económicas; por la tradición científica; por una masa crítica de científicos enfrascados en la libre discusión de ideas; por la existencia dentro de la comunidad

científica de individuos capaces de renunciar a esquemas de pensamiento preestablecidos o santificados por la tradición y capaces de explorar nuevas posibilidades.

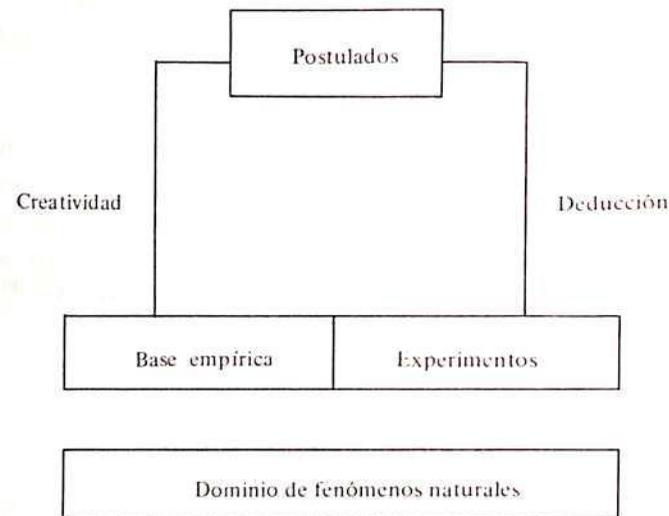


Figura - 1. Etapas que conducen al establecimiento de una ley científica o una teoría.

La cristalización de ideas la realiza por lo general un individuo, o unos pocos: Newton, Maxwell, Einstein, Schrödinger, Dirac, Heisenberg son ejemplos sobresalientes. El científico no tiene a su disposición un manual de procedimientos o un método que le permita alcanzar el objetivo deseado. Las únicas herramientas con las cuales cuenta con su creatividad, la habilidad, la intuición, la capacidad de abstracción, la mente excepcionalmente lúcida —que le permita distinguir entre los hechos generales y los particulares, entre lo esencial y lo secundario—. Ingrediente adicional fundamental es, naturalmente, tener una *idea* que desarrollar, la cual sea susceptible de plasmar en forma matemática, permitiendo así explorar sus consecuencias a través de ecuaciones y de las reglas estipuladas por la matemática; la idea sirve también como directriz en el trabajo de investigación. Unos ejemplos han de servir para ilustrar esta afirmación.

Siguiendo a Linus Pauling, en la contribución publicada en el libro editado por Kilmister (1987), podemos citar el caso de SCHRODINGER como ejemplo y decir: Su gran descubrimiento se basó en la idea de que las propiedades de los átomos y las moléculas se podrían calcular

solucionando una ecuación diferencial de una clase especial, una ecuación de valores propios. Esta idea y consideración de las ecuaciones clásicas de movimiento en forma Hamiltoniana lo condujeron a la ecuación de Schrödinger  $i\hbar\partial\psi(\delta,t) = H\psi(\delta,t)$ , la cual introduce funciones de onda complejas ( $i = \sqrt{-1}$ ) para describir fenómenos físicos.

En la creación de la mecánica cuántica relativista, al igual que en todo su trabajo teórico, desempeñó papel importante en el trabajo de Dirac la idea de la consistencia interna y la belleza matemática de las teorías físicas, en contraposición a una aproximación empirista-inductiva. Kragh (1981) asocia con Dirac la siguiente cita: “Más importante es tener belleza en las ecuaciones que tenerlas ajustando experimentos. . . Si se busca belleza en las ecuaciones y si se tiene realmente una buena idea, uno se encuentra sobre una línea segura de progreso”. Por ejemplo, en el desarrollo de la mecánica cuántica relativista, Dirac partió de la ecuación

$$i\hbar\partial\psi/\partial t = c(m_0^2 c^2 + p_1^2 + p_2^2 + p_3^2)^{1/2} \psi,$$

la cual era insatisfactoria debido a que no estaba de acuerdo con el principio de la relatividad que exigía que la energía ( $E \rightarrow i\hbar\partial/\partial t$ ) y el momento ( $p \rightarrow -i\hbar\nabla$ ) aparecieran en forma simétrica (invariantes bajo transformaciones de Lorentz). Dirac se preguntó si era posible linealizar la raíz cuadrada de la suma de cuatro cantidades. Esta idea fue crucial para lograr la consistencia entre relatividad especial y mecánica cuántica. Dirac hizo la linealización escribiendo

$$(m_0^2 c^2 + p_1^2 + p_2^2 + p_3^2)^{1/2} = \alpha_1 p_1 + \alpha_2 p_2 + \alpha_3 p_3 + \alpha_4 m_0 c$$

y después de muchos ensayos encontró que la única manera de solucionar el problema era permitir que los coeficientes  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ , no fueran números ordinarios sino matrices  $4 \times 4$ . En esta etapa crucial de la creación de la teoría, el problema fue puramente matemático. Como consecuencia de este procedimiento se justificó la existencia del spin.

Es de enfatizar que los postulados de una teoría física deben ser de una naturaleza tal que permitan el posterior trabajo deductivo. De nuevo, como dice Einstein: “el hecho empírico individual no tiene valor para el teórico, quien en rigor tampoco puede hacer nada con leyes generales aisladas descubiertas empíricamente. El físico teórico se hallará impotente frente a unos resultados inconexos, ofrecidos por la inves-



física, evaluado a la luz de la confrontación teoría-experimento. Siguiendo a Reichenbach (1955) puesto que "nada puede ser considerado como correcto en el mundo de la experiencia si contradice a la lógica" entonces el conocimiento natural forzosamente debe hacer uso de las relaciones desarrolladas por la matemática. En este sentido se debe entender la afirmación de que una teoría física es un modelo matemático de la naturaleza y explica la razón por la cual la matemática es mucho más que una herramienta en la física.

A la luz de lo anteriormente expuesto, es de observar que *una teoría física se desarrolla con base en dos pilares* completamente independientes: (1) definiciones y axiomas de naturaleza exclusivamente matemática, (2) definiciones y postulados de naturaleza física.

La matemática se preocupa por los teoremas y conclusiones que siguen rigurosamente a partir de los axiomas dados, los cuales (si los axiomas son independientes) no admiten el juicio de verdad o falsedad; los axiomas matemáticos son definiciones comparables a las reglas de un juego como el ajedrez. Los axiomas o postulados de naturaleza física pretenden por el contrario valer para la realidad, esto es, para explicar fenómenos observados en el mundo físico. El dotar una teoría física con una estructura matemática que la soporta permite extraer conclusiones de los postulados físicos a través de un razonamiento puramente lógico, enseñado por la matemática.

Puesto que todos los "hechos experimentales" son sólo aproximadamente verdaderos y pueden ser refutados o modificados por experimentos más exactos, entonces, los axiomas físicos tienen siempre un carácter provisional o, alternativamente, son aplicables para describir sólo un número limitado de fenómenos. Estos modelos físico-matemáticos de la naturaleza tienen, en consecuencia, un rango limitado de validez y la evolución de la física se orienta a incorporar una serie de hechos, como caso especial, en otra serie de hechos más general: Así, la mecánica newtoniana es un caso límite tanto de la mecánica cuántica como de la teoría especial de la relatividad.

Describamos un poco más en detalle lo que queremos significar con la afirmación de que *una teoría física es un modelo físico-matemático de la naturaleza*. Al estudiar un sistema físico —en una situación realista— ocurren simultáneamente una variedad de fenómenos físicos, cuya explicación involucra varias leyes naturales. Sin embargo, para descubrir

éstas se requiere simplificar artificialmente las circunstancias e influencias ambientales, de tal modo que el sistema quede en condiciones de comportarse de un modo muy simple, permitiendo, en consecuencia, la observación de un fenómeno aislado. Esta idea es clave para el éxito del método científico. El descubrimiento de Galileo de la ley de la caída libre de los cuerpos en la proximidad de la superficie terrestre ilustra esta afirmación, ya que al concluir que los cuerpos caen con una aceleración constante, que es la misma para todos (sea una pluma o un pedazo de plomo), se está considerando realmente un modelo en el cual se prescinde de la resistencia del aire.

Como consecuencia de la eliminación de una diversidad de factores se obtiene un modelo simplificado del sistema físico, el cual se supone que permite describir exactamente los fenómenos físicos. Con estos hechos simplificantes el físico teórico puede desarrollar su modelo matemático y hablar de una partícula libre, un átomo de hidrógeno en ausencia de cualquier influencia externa, un gas ideal, etc. Al físico experimental le corresponde la ardua tarea de realizar en el laboratorio de la mejor manera posible las circunstancias simplificantes en el modelo. Esto es requisito indispensable para hacer la posterior confrontación teoría-experimento.

## 6. EL PAPEL DE LA DEDUCCION EN EL METODO CIENTIFICO

Una vez establecidos los postulados de una rama de la física —llámese mecánica clásica, mecánica cuántica, relatividad especial, etc.— comienza el trabajo deductivo (ver figura -1) que realizan la gran mayoría de físicos teóricos. El trabajo deductivo es posible gracias a la matemática, la cual estipula las transformaciones a que podemos someter las cantidades físicas involucradas en los postulados sin que se altere su significado. Por esta razón, tal como se ha indicado en la sección anterior, la matemática desempeña un papel central en la física. Las actividades típicas del físico teórico se ilustran también explicando un poco lo que es el poder deductivo de las teorías físicas, lo cual se hará a continuación.

### A) DEDUCCION DE CONSECUENCIAS FISICAS DE CARACTER GENERAL

El trabajo deductivo se realiza en varios niveles. En un primer nivel se trata de obtener las consecuencias físicas de carácter general que

siguen a partir de los postulados físicos establecidos y de las reglas de juego matemáticas acordadas.

Por ejemplo, las consecuencias de la mecánica newtoniana trascienden las aplicaciones a sistemas específicos, al dar origen a ciertas leyes de conservación que se cumplen cuando en los sistemas mecánicos se dan ciertas circunstancias especiales. Al incluir Newton el concepto de fuerza gravitacional, en adición a los tres postulados previamente enunciados, la teoría pudo explicar no solo los movimientos planetarios sino también el comportamiento de cuerpos macroscópicos cerca a la superficie de la tierra. Lo siguiente ilustra estas consideraciones:

Premisas:      Leyes de Newton (postulados de la mecánica)  
                     Ley de gravitación Universal

Conclusiones: Cinemática Galileana, Leyes de Kepler, Conservación del momentum lineal, Conservación de la Energía y Conservación del momentum angular.

Mientras Newton supone implícitamente que es posible transmitir instantáneamente información de un lugar a otro, Einstein explícitamente establece que esto no es posible y que hay una velocidad máxima finita con la cual la información se puede transmitir de un lugar a otro. Esto trae profundas consecuencias sobre los conceptos de espacio y tiempo y permite derivar propiedades generales de origen netamente relativistas, las cuales se esquematizan (sin explicación adicional) en la Figura -2 (Goldberg, 1984).

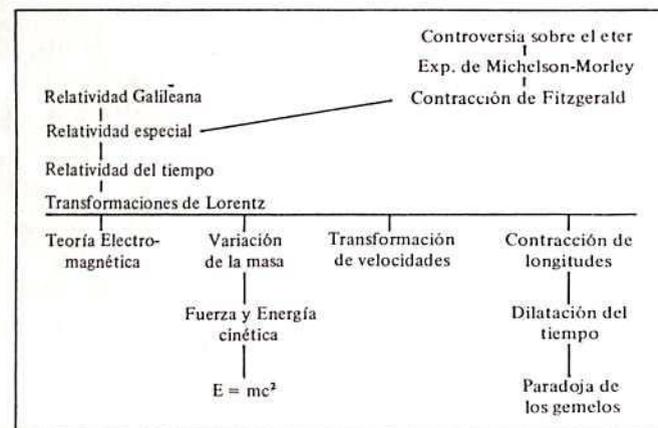


Figura -2. Consecuencias generales deducidas en la teoría de la relatividad especial.

De la formulación Newtoniana sigue una consecuencia general importante: El principio clásico de relatividad, el cual establece que las leyes de Newton son invariantes bajo transformaciones Galileanas. Por estas se entiende un conjunto de ecuaciones de transformación que relacionan las coordenadas espaciales y temporales de una partícula con respecto a dos sistemas de referencia inerciales,  $o'$  y  $o$ , que se mueven el uno respecto al otro con velocidad  $V$ :  $x' = x - vt$ ,  $y' = y$ ,  $z' = z$ ,  $t' = t$ . Desde el punto de vista físico este principio establece que si ciertas leyes de la mecánica son válidas en un sistema inercial de referencia entonces en cualquier otro sistema de referencia inercial se aplican las mismas leyes; todos los observadores concuerdan en la forma de la ley a pesar de que pueden diferir en el valor de cada una de las cantidades que han medido.

En la relatividad especial las transformaciones de Galileo se generalizan a las *transformaciones de Lorentz*, las cuales son consecuencia de los dos postulados de la teoría:

$$X' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}, y' = y, z' = z, t' = \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

En toda teoría física es de gran interés el estudio de las propiedades de simetría de los sistemas físicos, la consiguiente invariancia de las ecuaciones de movimiento bajo ciertas transformaciones matemáticas, la determinación de leyes de conservación, la clasificación de las posibles soluciones de un problema físico, así como la exclusión de cierto tipo de soluciones (reglas de selección). En la mecánica clásica, por ejemplo, la homogeneidad del espacio físico, según la cual las propiedades mecánicas de un sistema cerrado no varían por un desplazamiento paralelo de todo el sistema en el espacio, se manifiesta en el hecho de que las ecuaciones de la mecánica son invariantes de forma cuando se cambia el origen del sistema de coordenadas; el sistema mecánico cerrado admite entonces el momentum lineal como constante de movimiento. Similarmente, las leyes de conservación de la energía y el momentum angular están relacionadas respectivamente con la homogeneidad del tiempo y la isotropía del espacio. En la mecánica cuántica valen afirmaciones análogas, surgiendo además otras sin análogo clásico: la relación entre spin y simetría exigida a la función de onda, respecto al grupo de permutaciones de partículas idénticas; el principio de exclusión de Pauli válido para fermiones.

Lo anteriormente expuesto ilustra el hecho de que asociada con cada teoría física existen un conjunto de consecuencias de carácter general, las cuales debe descubrir el físico teórico mediante un trabajo puramente deductivo.

## B) DESARROLLO DE METODOS DE APROXIMACION

Una segunda actividad del físico teórico consiste en desarrollar métodos de aproximación. Una de las causas por las cuales surge esta necesidad es la debida al hecho de que al estudiar un sistema físico, a la luz de una teoría general, aparece invariablemente las dificultades de cálculo, las cuales se hacen rápidamente insuperables a medida que aumenta el número de partículas involucradas en un sistema o la complejidad de los fenómenos físicos involucrados. Pocos sistemas físicos admiten una solución analítica de sus ecuaciones de movimiento.

La mecánica newtoniana sólo permite resolver analíticamente unos pocos casos sencillos: la partícula libre, una partícula en un campo gravitacional, el oscilador armónico, fuerzas centrales. No existe por ejemplo una solución analítica conocida para describir el movimiento de tres partículas sujetas a sus interacciones mutuas. En la mecánica cuántica son solubles analíticamente ejemplos académicos y algunos sistemas sencillos como los enunciados previamente para la mecánica clásica, además el átomo de hidrógeno, el ion molecular de hidrógeno. Sistemas como el átomo de helio o la molécula de hidrógeno no tienen una solución analítica conocida.

Los métodos de aproximación hay que desarrollarlos también con el fin de evitar usar una técnica matemática excesivamente poderosa cuando no es necesario. Ilustremos esto con un ejemplo. El movimiento de la tierra alrededor del sol se puede describir, en principio, mediante la mecánica cuántica ya que esta teoría incluye la física newtoniana como un caso particular. Sin embargo, sería absurdo, desde el punto de vista práctico, usar la mecánica cuántica para este fin. Sabiendo que el movimiento de la tierra es un comportamiento completamente clásico, lo que es importante es analizar la manera y las condiciones bajo las cuales se hace la transición de la mecánica cuántica a la mecánica clásica, vale decir, investigar cuándo los efectos cuánticos no son importantes en un sistema físico. Los procedimientos desarrollados con este fin en la mecánica cuántica se conocen con el nombre de métodos semiclásicos.

## C) INTERRELACION CON EL TRABAJO DE LOS FISICOS EXPERIMENTALES

La tercera actividad que desarrolla el físico teórico está en concordancia con el hecho de que la teoría tiene un doble papel que desempeñar: *predecir e interpretar*. El teórico debe mantener estas distinciones en mente y presentar sus trabajos mostrando claramente estos dos papeles de la teoría. El físico teórico desarrolla esta actividad por varias razones: con el fin de hacer predicciones sobre las propiedades y comportamiento de un sistema para obtener así datos susceptibles de una posterior confrontación experimental; con el fin de explicar a la luz de las leyes naturales un comportamiento previamente observado en el laboratorio por el físico experimental; por simple curiosidad científica; por el interés de someter a prueba una idea o un método de aproximación previamente desarrollado; para confrontar sus predicciones con cálculos teóricos exactos o con otros métodos de aproximación.

Como ejemplo podemos citar el descubrimiento de Neptuno, el cual fue el primer planeta descubierto mediante cálculos matemáticos. Los astrónomos habían observado unos movimientos inexplicables del planeta Urano. Dos astrónomos franceses conjeturaron que tal comportamiento debería poderse explicar debido a la interacción gravitacional con otro planeta, cuya posición calcularon haciendo uso de la teoría de Newton. En septiembre de 1846 Galle, un astrónomo alemán, dirigió su telescopio al sitio donde la teoría predecía que debía estar el planeta y en cuestión de unas pocas horas pudo descubrir un nuevo planeta que recibió el nombre de Neptuno.

Einstein, haciendo uso de la teoría especial de la relatividad, predijo la equivalencia entre masa y energía,  $E = mc^2$ , la cual fue verificada de manera dramática con la explosión de la bomba atómica. La predicción de Einstein, basada en la teoría general de la relatividad, de que un rayo de luz procedente de las estrellas al pasar cerca al sol debería experimentar una curvatura fue brillantemente confirmada cuantitativamente durante el eclipse solar total del 29 de mayo de 1919. En cada campo de la física existen ejemplos similares que muestran el carácter predictivo de cada teoría física, así los ejemplos sean menos espectaculares a los ya citados.

Una interacción entre el físico teórico y el físico experimental es deseable ya que el primero tiene que aprender de la experiencia mientras que el segundo debe aprender sobre la explicación de los fenóme-

nos físicos a través de las leyes naturales. Si en una confrontación teoría-experimento la concordancia es insatisfactoria, se hace necesario en la teoría hacer aproximaciones menos exigentes y repetir el procedimiento indicado. Se trata de estudiar un sistema físico mediante *aproximaciones sucesivas*, lo cual permite escudriñar los aspectos físicos fundamentales involucrados en los postulados que son a la vez relevantes para explicar el fenómeno objeto de estudio. Alternativamente, el físico experimental debe revisar sus procedimientos y métodos de medición con el fin de garantizar la confiabilidad de sus datos.

#### D) APROXIMACIONES USANDO CALCULO NUMERICO

Quizá más que ninguna otra ciencia, la física expresa sus observaciones en términos numéricos. Por esta razón el físico teórico no puede conformarse con la deducción de conclusiones generales o el desarrollo de métodos de aproximación. El debe aprender métodos de *cálculo numérico* y desarrollar los consiguientes algoritmos para el procesamiento electrónico de datos. Afortunadamente para la física, existe la matemática aplicada la cual crea métodos susceptibles de ser convertidos en algoritmos para solucionar numéricamente problemas de álgebra lineal, ecuaciones diferenciales ordinarias o parciales, ecuaciones integrales, etc.

### 7. PAPEL DE LA FISICA EXPERIMENTAL Y LA TECNICA

El desarrollo de la física como ciencia tiene un doble origen: la existencia de teorías coherentes que permitan deducir consecuencias verificables experimentalmente y la corroboración de las predicciones teóricas mediante experimentos.

Suponiendo que los experimentos se han hecho apropiadamente, la base empírica de una teoría y los resultados experimentales con ella asociados no cambian con el tiempo. Por esta razón los resultados experimentales permanecen como pilares de la ciencia, para siempre. Lo que cambia con el tiempo es la naturaleza de los postulados que son aceptables para explicar fenómenos observados. Los desarrollos experimentales y mejoras técnicas permiten hacer mediciones con mayor precisión, mejorando la confiabilidad de datos ya conocidos. Naturalmente hacen

posible también la medición de fenómenos predichos por la teoría o susceptibles de ser analizados a la luz de ella, así como también la medición de efectos más finos inicialmente no contemplados.

Si se trata de verificar una predicción teórica, al físico experimental le corresponde desarrollar su experimento de tal modo que se cumplan de la mejor manera posible las simplificaciones artificiales que se involucraron en la teoría. Sólo a través de esta metodología es posible hacer una comparación juiciosa entre resultados teóricos y experimentales que permita extraer consecuencias sobre el modelo teórico desarrollado y la calidad de las aproximaciones usadas.

Sea la oportunidad de enfatizar que la división entre física teórica y física experimental no significa más que una división del trabajo dentro de la física. Es objetivo de la física como ciencia estudiar los fenómenos naturales y explicarlos haciendo uso de las leyes naturales. Este objetivo marca la diferencia entre física experimental y técnica. La técnica no es una ciencia en (el sentido del método científico) sino la aplicación de las propiedades y características físicas de los sistemas a fines de utilidad práctica.

El físico y el técnico hacen uso del concepto matemático de función,  $y = f(x)$ , que hace depender en forma fija las variaciones de una magnitud física,  $y$ , de las de otras,  $x$ . La técnica, mediante métodos fenomenológicos y mediante mediciones directas realizadas en el sistema objeto de estudio, establece al igual que la física conexiones funcionales entre las variables y consigue de este modo una serie de parámetros que caracterizan el material. Para el técnico estas "constantes del material" son suficientes para satisfacer el fin de utilidad práctica, buscando por la técnica. Para el físico, sea teórico o experimental, una fórmula de este tipo fenomenológico no es otra cosa que un punto de partida para iniciar un esfuerzo teórico que justifique y explique el resultado obtenido haciendo uso de las leyes naturales.

Naturalmente, las conexiones teóricas encontradas por el físico pueden servir al técnico como indicadores cualitativos que lo orienten en la búsqueda de ese nuevo material o ese nuevo procedimiento que necesita para desarrollar algo de aplicación práctica; a fuerza de tanteo nunca llegará el técnico a la meta, así que necesita de un punto de apoyo que le marque la dirección de las modificaciones que trata de establecer. Ese punto de apoyo está en la física y en sus métodos.

La mecánica clásica, o ciencia del movimiento, se estableció en los siglos XVII y XVIII. Al final de este período aparecieron las primeras máquinas industriales y fábricas. Siguiendo a De Broglie nos preguntamos: "¿Cómo se podrían haber perfeccionado o inventado nuevas máquinas si las leyes de movimiento no hubiesen sido conocidas?". Preguntas como ésta sigue y seguirán siendo vigentes para realzar la íntima relación entre ciencia, técnica y desarrollo tecnológico.

## 8. CONCLUSION

Con el fin de explicar lo que es el método científico y el papel que él ha desarrollado en la física, se han tratado varios temas: La introducción de postulados como un proceso creativo, ligado a una base empírica conocida; las teorías físicas como modelos físico-matemáticos de la naturaleza, lo cual explica el poder deductivo de la física teórica; el doble papel de predecir e interpretar asignado a las teorías físicas (vale decir, a sus aplicaciones particulares). Bajo ninguna circunstancia el método científico se puede identificar con un manual de procedimiento. Su riqueza está en la flexibilidad y creatividad que permite, exigiendo sólo procedimientos deductivos rigurosos (matemáticos, en el caso de la física) y evaluando la calidad de las teorías por su consistencia lógica y la confrontación teoría-experimento.

## APENDICE

Este apéndice tiene como objetivo dar ejemplos sobre los postulados que caracterizan algunas teorías físicas al igual que servir de ilustración a la sección -4, en particular a la siguiente afirmación de Einstein: "Una teoría puede ser verificada por la experiencia, pero no hay ningún camino que lleve de la experiencia a la creación de una teoría". Esto es, los postulados no se pueden inferir a partir del simple hecho de tener una gran colección de datos experimentales, sino que surgen a través de procesos de creatividad que se han presentado en ciertas etapas de la historia.

## MECANICA NEWTONIANA

*Principio de inercia:* Es posible adoptar, por lo menos, un sistema de referencia (llamado inercial) para el cual toda partícula aislada continúa en su estado de reposo o de movimiento rectilíneo y uniforme.

*Segundo principio:* La derivada temporal de la cantidad de movimiento es proporcional a la fuerza que actúa sobre el cuerpo y tiene su dirección y sentido,  $d\vec{p}/dt = \vec{F}$ .

*Principio de acción y reacción:* A toda acción se opone una reacción igual y de sentido contrario.

## RELATIVIDAD ESPECIAL

*Principio de relatividad restringida:* Toda ley universal válida en relación con un sistema inercial de coordenadas  $C$ , también ha de ser válida en relación con un sistema de coordenadas  $C'$ , siempre que éste esté dotado de un movimiento uniforme de traslación con respecto a  $C$ .

*Principio de la constancia de la velocidad de la luz en el vacío:* La luz en el vacío siempre tiene una determinada velocidad de propagación  $c$ , independiente del estado de movimiento del observador o de la fuente de luz.

## MECANICA CUANTICA

*Postulado 1:* Todo sistema mecánico cuántico tiene asociado un espacio vectorial lineal  $H$ , cuyos elementos  $\psi(q,t)$  representan los estados físicos del sistema en el instante de tiempo  $t$ .

*Postulado 2:* Cualquier observable de un sistema mecánico cuántico  $\mathfrak{A}$  representa por un operador lineal hermítico  $B$ , construido como función de los operadores básicos asociados con las partículas. Cada partícula tiene asociados un conjunto de operadores básicos de posición,  $q$ , de impulso,  $p$ , de spin,  $S = (s_1, s_2, s_3)$  los cuales satisfacen las relaciones de conmutación  $qp - pq = i\hbar I$ ,  $[s_1, s_2] = i\hbar S_3, \dots$

*Postulado 3:* Al hacer una medición de un observable  $B$ , el único resultado posible de la medición es un valor propio del operador que representa el observable. Como consecuencia de la medición, inmediata-

mente después de ésta, el sistema queda preparado en el estado representado por el vector propio correspondiente al valor propio que se obtuvo en la medición. Relevante a este postulado es la ecuación  $B \varphi_n(q) = b_n \varphi_n(q)$ ; los números  $b_n$  son los valores propios y las funciones  $\varphi_n(q)$  son los vectores propios del operador  $B$ .

*Postulado 4:* Si sabemos que el sistema se encuentra en el estado  $\psi(q, t_0)$  y hacemos una medición del observable  $B$ , en el instante de tiempo  $t_0$ , entonces

$$P_n = \int dq \psi_n^*(q) \psi(q) |^2$$

representa la probabilidad de obtener como resultado de la medición el valor propio  $b_n$ .

*Postulado 5:* Si en el instante de tiempo  $t_0$  el sistema ha sido preparado en el estado  $\psi(q, t_0)$  entonces para  $t \geq t_0$  la evolución temporal del estado  $\psi(q, t)$  del sistema está gobernada por la ecuación de Schrödinger

$$i\hbar(\partial/\partial t) \psi(q, t) = H\psi(q, t)$$

donde  $H$  es el operador asociado con la energía total del sistema.

*Postulado 6:* El estado de un sistema de  $N$  partículas idénticas se describe por una función completamente simétrica (si son bosones) o completamente antisimétrica (si son fermiones) respecto a cualquier permutación de las  $N$  partículas.

## AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a la profesora Angela Guzmán y al profesor Mauricio García por la lectura del manuscrito y valiosas sugerencias realizadas.

## REFERENCIAS

- Campos D., 1981, Rev. Acad. Col. de Ciencias Exac., Fis. y Nat. 15, 79: Albert Einstein: Algunos Aspectos epistemológicos.
- Condon E. W., 1962, en ¿Qué es la Ciencia?, J. R. Newman (Ed.) Aguilar, Madrid.
- Corben H. C. y Stehle P., 1960, Classical Mechanics, Wiley, New York.

- Davies P., 1983, Otros Mundos: El espacio y el universo cuántico, Salvat, Navarra.
- De Broglie L., 1955, Physics and Microphysics, Harper & Brothers, New York.
- Einstein A., 1983, Sobre la teoría de la relatividad y otras aportaciones científicas, SARPE S.A., Madrid.
- French A. P. (Ed.), 1979, Einstein: A Centenary Volume, Heinemann, London.
- Freedman Z. y Nieuwenhuizen P. van, 1978, Investigación y Ciencia, abril, pag. 78: Supergravedad y la unificación de las leyes de la física.
- Goldberg S., 1984, Understanding Relativity: Origin and Impact of a Scientific Revolution, Clarendon Press, Oxford.
- Heisenberg W., 1930, The Physical Principles of the Quantum Theory, Dover, New York.
- Kilmister C.W. (Ed.), 1987, Schrödinger: Centenary celebration of a polymath, Cambridge University Press, London.
- Kragh H., 1981, Archive for History of Exact Sciences 24 31: The Genesis of Dirac's Relativistic Theory of Electrons.
- Kuznetsov I. V., 1977, La Estructura de la teoría física. Este trabajo y otros de diferentes autores han sido recopilados por Alicia G. de Mesa en: Problemas de Interpretación de la Mecánica Cuántica, Dpto. de Física, Universidad Nacional, Bogotá.
- Landé A., 1960, From Dualism to Unity in Quantum Physics, Cambridge, London.
- Reichenbach H., 1955, Objetivos y Métodos de Conocimiento Científico, Fondo de Cultura Económica, México.
- Rohrlich F., 1965, Classical Charged Particles: Foundations of Their Theory, Addison-Wesley, Massachusetts.
- Russell B., 1983, La Perspectiva Científica, SARPE S.A. Madrid.
- Schopper H. F., 1983, El sueño de la unificación de las fuerzas. Reportaje publicado por la revista alemana Der Spiegel, 13.6.83.
- Schrödinger E., 1975, ¿Qué es una ley de la naturaleza?, Fondo de Cultura Económica, México.
- Synge J. L., 1969, en Handbuch der Physik vol III/1, Springer Verlag, Berlin.
- Tolman R., 1966, Relativity, Thermodynamics and Cosmology, Oxford University Press, London.

TEORIA CUANTICA  
ALGUNAS CONSECUENCIAS FILOSOFICAS,  
CIENTIFICAS Y TECNOLOGICAS

CICLO DE CONFERENCIAS EN  
EL CENTENARIO DE

ERWIN SCHRÖDINGER  
1887 - 1963

12

*CARLOS URIBE G. Profesor Departamento de Física Facultad  
de Ciencias, Universidad del Valle, Cali - Colombia Apartado  
25360.*

## ALGUNAS CORRIENTES DE INTERPRETACION EPISTEMOLOGICA DE LA MECANICA CUANTICA

---

12

CARLOS URIBE G

### RESUMEN

Para criticar las posiciones confrontadas de interpretación de la Mecánica Cuántica, se discute un posible marco epistemológico: Positivismo y Realismo (local), –como posiciones extremas–; y “Empirismo Racional”, –posición intermedia. La última posición engloba posturas ontológicas muy diversas: la de este artículo (que es, con algunos matices, la postura de D’Espagnat), plantea la dualidad entre “realidad empírica” y “realidad en sí”. Se propone un nuevo “status” ontológico para las entidades microfísicas.

### ABSTRACT

In order to criticize the confronted interpretative positions on Quantum Mechanics, it is discussed a possible epistemological framework: Positivism and (local) Realism, as extreme positions, and “Rational Emprism”, as the intermediate position. The latter comprises many diverse ontological postures; the one of the article (which is, with certain precisions, the one sustained by D’Espagnat), poses the duality between “empirical reality” and “reality itself”. It is proposed a new ontological “status” for microphysical entities.

---

BOGOTA, OCTUBRE DE 1987

180

## INTRODUCCION

El presente trabajo es el resultado de una primera aproximación crítica, aunque no exhaustiva, a la abundante literatura sobre el tema. Nuestro objetivo es clarificar el estado presente del debate epistemológico sobre la Mecánica Cuántica (MC), a la luz de los recientes desarrollos sobre la no separabilidad.

Los problemas epistemológicos suscitados por la MC son complejos y delicados; se han enfocado desde muchos puntos de vista, los cuales es imposible abarcar, aún grosso modo, en un artículo breve. No obstante, consideramos que nuestra esquematización de las diversas posiciones de interpretación epistemológica de la MC, en tres grandes corrientes (que no son escuelas de pensamiento homogéneas), de algún modo comprende todas esas posiciones. Al idealizar un poco el estado actual de la cuestión, no hacemos otra cosa que aplicar a nuestro problema epistemológico, el método científico con sus limitaciones inherentes.

Entendemos por interpretación epistemológica de una teoría física, la afirmación o negación de su sentido cognoscitivo: si alcanza o nó una realidad extramental independiente; en qué grado de objetividad describe tal realidad, suponiendo que sea alcanzable. En otras palabras, nos preguntamos por el "referente" de la teoría, y cómo ésta logra reflejar tal referente.

No se pretende presentar un análisis acabado y excluyente, aunque el enfoque del trabajo no es puramente expositivo: se intenta defender una posición definida. Sin embargo, tratándose de un debate filosófico, estaría fuera de lugar asumir una actitud dogmática, y pretender dar por cerrada la discusión.

Muchos físicos han desdeñado tales cuestiones, negando la relevancia filosófica de la física. Se piensa, implícita o explícitamente, que la MC es meramente un recetario matemático que funciona; a ello se agrega la ignorancia respecto a las cuestiones filosóficas fundamentales, ignorancia disfrazada con cierto ropaje positivista: la filosofía como una elucubración nebulosa. Este rechazo es de hecho una posición filosófica determinada; posición por cierto inconsistente e ingenua, como ya Aristóteles había mostrado y se colige de cualquier aproximación seria a la filosofía<sup>1</sup>.

La totalidad de los físicos prominentes son conscientes de la necesidad de una fundamentación filosófica de la ciencia. Dice De Broglie: "La ciencia, al desarrollarse, se ve constreñida a introducir en sus teorías conceptos que tienen un alcance metafísico, como son los de tiempo, espacio, objetividad, causalidad, individualidad, etc. La ciencia intenta dar definiciones precisas de estos conceptos, que entren en el marco de los conceptos que ella emplea, y procura evitar, respecto a ellos, toda discusión filosófica; quizás, procediendo así, hace muchas veces metafísica sin saberlo, lo cual no es la manera menos peligrosa de hacer metafísica<sup>2</sup>".

Por otra parte, la MC, como una mera herramienta matemática, no es satisfactoria ni siquiera en un plano meramente científico; "Se espera que no solo sea capaz de determinar los resultados de un experimento, sino que nos dé también alguna comprensión de los sucesos físicos que presumiblemente sustenta los resultados observados. En otras palabras, la teoría no debe conformarse con dar la posición de una aguja sobre una escala, sino que ha de explicar por qué la aguja toma aquella posición<sup>3</sup>". Empero, la actitud de la mayoría de los físicos es renunciar, de hecho, a una comprensión tal de los sucesos físicos, aunque sin declarar un sin sentido la actitud opuesta. Es comprensible esa reducción de la MC a lo práctico, en cuanto se apoya en el respeto a la especialización del saber; no es otra cosa, en efecto, que una prudente abstención de indagaciones filosóficas en quien se reconoce no preparado para ello. Es claro que no es correcto tildar de positivistas a tales físicos, aunque su no toma de posición epistemológica aparentemente empareje a unos y otros. Empezemos justamente revisando la postura positivista y mostrando lo que afirmamos en el último enunciado.

## I. INTERPRETACION POSITIVISTA

Desde 1926 se evidenció las dificultades de interpretación de la flamante MC. Las controversias de entonces, que muchos consideran aún no cerradas, motivaron en buena parte el resurgimiento del positivismo; así se dió lugar al Positivismo Lógico, o Empirismo Lógico del Círculo de Viena (también llamado Neopositivismo). Después de detenernos un poco en algunas ideas centrales de este movimiento filosófico-científico, expondremos brevemente su relevancia en la MC.

Lo único que en realidad conocemos, de acuerdo a este movimiento, es el fenómeno, la observación —en cuanto sensación humana—, lo que es verificable en la experiencia empírica. No tiene sentido la afirmación o negación de la existencia de un substrato que sustente ese fenómeno, pues tal proposición tendría un carácter metafísico, lo cual la excluye a priori. No tiene sentido la pregunta sobre las causas subyacentes de lo observado por el experimentador.

En esta postura los asertos científicos no empíricos o no protocolarios se deben concebir, si se quiere ser consistente, como construcciones enteramente mentales, sin correspondencia a una realidad extramental; cualquier enunciado referente a esa realidad sería un sinsentido. Nuestro universo de ideas sería una creación libre de la mente, “inventada” para poner orden en los fenómenos y para correlacionar la información pretérita con la información que se espera obtener en observaciones futuras. Esas construcciones teóricas tienen “sentido” en cuanto reducibles a lo empírico, aunque su carácter es lógico o matemático o semántico, etc., según la diversidad de escuelas de inspiración positivista.

Esta posición es atractiva por cuanto se fundamenta sobre los principios metodológicos más sagrados de la ciencia, si cabe decir:

- El recurso exclusivo a la observación, la experimentación y la medida: lo empírico, única fuente de los datos que la ciencia elabora y único criterio para discriminar efectivamente entre las diversas teorías rivales.
- La construcción, libre de todo apriorismo racionalista, de hipótesis o postulados, con la única restricción del acuerdo con los datos empíricos.

Es fácil, por tanto, que un físico se deje impresionar por la aparente irrefutabilidad del a priori positivista: sólo tiene sentido lo que es verificable por procedimientos empíricos. Muchas veces se ha hecho notar la inconsistencia de este postulado, que se niega a sí mismo en razón de su no verificabilidad. Por tanto, la filosofía positivista no es satisfactoria, aunque sus aspectos metodológicos son atinados, por lo general; de hecho, sería difícil hallar un físico netamente experimental que encuentre insatisfactorios los principios metodológicos del positivismo lógico, si los llegara a conocer.

De afirmar que el físico conoce la naturaleza sólo en tanto en cuanto se manifiesta a través del experimento, no se sigue que no conozca de algún modo la realidad en sí. No se trata, es verdad, de un conocimiento absoluto; es un conocimiento inherentemente condicionado o relativo a nuestro modo de conocer: la postura realista ingenua es tan insostenible como la positivista. Precisar el modo de nuestro conocimiento de la realidad es difícil (volveremos más adelante sobre ello), pero el hecho mismo es indudable: “si el investigador dudase un solo instante que los resultados de su investigación tuvieran un significado objetivo, por no ser más que un puro producto subjetivo de su pensamiento, especie de “rumia” interior sin ningún alcance real, la razón misma de su esfuerzo se derrumbaría. Si el hombre de ciencia se afana y trabaja, luchando con una materia huidiza, es para arrancar a ésta sus secretos, para dominarla penetrándola con el pensamiento<sup>4</sup>”.

Es fácil advertir la debilidad del positivismo: no explica el poder de predicción y de transformación de la naturaleza que tiene la ciencia. Las leyes físicas, que no son enunciados fenoménicos, tienen un carácter objetivo y extramental; si fueran subjetivas no tendrían ningún poder de predicción. Conserva su plena validez el razonamiento de Poincaré contra las posiciones de Mach y Le Roy: o la ciencia física no permite la previsión de los fenómenos y, entonces, carece de todo valor incluso para los fines prácticos y utilitarios, o permite una previsión más o menos perfecta y, entonces, por eso mismo, no carece de valor como medio de conocer la realidad<sup>5</sup>.

Los neopositivistas han tratado de sortear esta dificultad y otras muchas de un modo u otro: han corregido una y otra vez sus posiciones, sin llegar a soluciones satisfactorias<sup>6</sup>. En el fondo, esta postura constituye una voluntaria y arbitraria renuncia a aceptar un valor metafísico al conocimiento humano.

Retornemos a la problemática epistemológica de la MC. Muy pocos físicos eminentes han adoptado explícitamente el positivismo lógico o sus derivaciones. Sin embargo, muchos autores de textos de MC, aunque se consagran casi exclusivamente a la enseñanza de los algoritmos cuánticos —pues dedican a los fundamentos sólo unas cuantas páginas—, han adoptado, sin bien implícitamente, una “mentalidad” impregnada de positivismo. E.C. Kemble es una notable excepción, en cuanto explícita su opción positivista<sup>7</sup>. Este autor considera el trabajo del físico como una mera descripción de los hechos experimentales<sup>8</sup>; le

corresponde “no el estudio del mundo externo, sino el estudio de una porción del mundo interno de la experiencia<sup>9</sup>”. En consecuencia, “la función de onda es meramente una herramienta computacional *subjetiva*, y en ningún sentido una descripción de la realidad objetiva<sup>10</sup>”.

A pesar de esa conocida reluctancia de los físicos a comprometerse en posturas filosóficas definidas, no es arriesgado enmarcar a algunos dentro del positivismo (no sólo metodológicamente): en cuanto reducen la MC, *en principio*, a una pura herramienta matemática. R. Feynman es uno de los más connotados físicos que asumen esta posición: “Así que no hay dudas experimentales sobre las amplitudes (de la MC): se pueden tener todas las preocupaciones filosóficas que se quieran sobre lo que estas amplitudes significan (*si, en efecto, significan algo en absoluto*), pero ya que la física es una ciencia experimental, *nos basta* con que la MC concuerde con el experimento<sup>11</sup>”. (El subrayado es mío).

Una tendencia similar se podría leer entre líneas en muchos de los textos ortodoxos de la MC. Como afirma D’Espagnat, sería preferible “que los científicos cuyas concepciones son prestadas del positivismo, reconocieran bajo el disfraz de unos métodos efectivos, la verdadera naturaleza de su opción<sup>12</sup>”.

## II. INTERPRETACIONES REALISTAS LOCALES

Las diversas interpretaciones no ortodoxas de la MC tienen como carácter común, desde el punto de vista epistemológico, el “realismo local”. La palabra “realismo” en este contexto, se usa analógicamente: con un sentido en parte igual y en parte distinto al del vocabulario filosófico tradicional. El realismo local sostiene, en una forma moderna, la ontología atomística de Leucipo y Demócrito (aunque no necesariamente es una concepción mecanicista): los átomos, electrones, fotones, etc. son las entidades reales; son *entes substanciales*, por decirlo de alguna manera: cosas subsistentes en sí mismas; por ello tienen propiedades que existen independientemente de su observación. Otto Frisch afirmó: “Hay que admitir que existe un mundo exterior *que consta* de partículas que poseen localización, tamaño, consistencia y todo lo demás. Es algo más dudoso que posean color y olor; de todos modos, son partículas genuinas que están ahí, las estamos observando o no<sup>13</sup>”.

La variedad de interpretaciones no ortodoxas se origina en las muchas alternativas exploradas para conciliar tal “realidad clásica” de las entidades microfísicas con su comportamiento no descriptible, por lo menos a primera vista, con la Mecánica Clásica. Se pretende modificar ésta para dar cuenta del comportamiento observado de la materia a escalas inframicroscópicas, conservando de algún modo los presupuestos epistemológicos de esa mecánica: determinismo causal, descripción atomística intuitiva, sentido de realidad independiente de las observaciones, etc.

Por ejemplo, Bohm y J. Bub suponen que existe una realidad infra-cuántica determinista (teorías de variables ocultas) que no está a nuestro alcance, por lo cual el comportamiento cuántico “parece ser” indeterminado: La MC es incompleta. A una conclusión semejante llegan quienes sostienen interpretaciones de carácter estadístico: Einstein, Margenau, Popper, Blokhintsev, Landé. Las interpretaciones estocásticas —en especial la electrodinámica estocástica, que enfrenta considerables dificultades de cálculo, por lo cual todavía está en elaboración— pretenden mostrar que la MC constituye en realidad una teoría clásica de procesos estocásticos. Una exposición de estas interpretaciones no es posible en los límites de este artículo. El trabajo pionero de M. Jammer<sup>14</sup> es la referencia indispensable al respecto, para los trabajos anteriores a 1974. Aún es prematuro evaluar los desarrollos en estas líneas posteriores a ese año, entre otras razones porque los trabajos de A. Aspect en los primeros años de nuestra década, como luego veremos, han obligado a revisar los planteamientos fundamentales de las propuestas no ortodoxas.

Además de las interpretaciones realistas en sentido clásico, que acabamos de reseñar, se ha especulado sobre una interpretación realista netamente cuántica (i.e., que no requiere modificaciones en el formalismo establecido). Es la “interpretación en mundos múltiples”, a la que nos referimos en apéndice.

La importancia del experimento de Aspect, que ha sido comparada a la del experimento de Michelson-Morley<sup>15</sup>, consiste, para decirlo en pocas palabras, en la confirmación de la no-separabilidad. Esta característica fundamental del mundo físico impone, en efecto, fuertes restricciones a los intentos de reinterpretación de la MC no ortodoxos. Expondremos muy sucintamente lo esencial de la no separabilidad resumiendo la presentación simplificada que hace D’Espagnat en un famoso artículo

de Scientific American<sup>3</sup>. El lector interesado en un tratamiento riguroso del teorema de Bell encontrará una exposición accesible en Jammer<sup>16</sup>, y una exposición ampliada de la no separabilidad en las obras de D'Espagnat (17, 18, 19, 20).

El presupuesto realista (se subentiende la localidad, salvo indicación en contra) afirma que las propiedades de los objetivos microfísicos preexisten a su medición, puesto que tienen un valor independiente de su observación.

Consideremos, desde esta postura, dos protones en estado singlete ( $S=\phi$ ). Si se mide la componente  $z$  del spin individual de uno de ellos, se obtendrá, por ejemplo, el valor  $1/2$ . Simultáneamente se mide la componente  $y$  del otro protón:  $-1/2$ . Debido a las propiedades del estado singlete, sabemos que, *si pudiéramos medir* (!) la componente  $y$  del spin del primer protón, obtendríamos el valor  $+1/2$ . Aceptando que de hecho, esa medida no puede efectuarse, la propiedad a que se refiere existe —desde la postura realista— independientemente de la posibilidad de su medición. Se concluirá entonces que se “*conocen*”, *simultáneamente, las componentes  $z$  y  $y$  del spin de una partícula*. Esta afirmación contradice el principio de incertidumbre. Constituye una de las formas de la famosa paradoja, EPR, seguramente conocida por el lector.

Hasta 1964, se pensaba que la paradoja EPR no tenía relevancia cuantitativa verificable. En ese año John Bell demostró su famoso teorema: si se aceptara el presupuesto epistemológico realista, se debe obtener un cierto límite en una cantidad mensurable: el grado de correlación entre mediciones de componentes distintas de los espines de sendos protones en estados singletes. En cambio, de acuerdo a la MC ortodoxa, se debería obtener un grado mayor de correlación, también cuantitativamente definido. Bell obtuvo el límite primeramente mencionado en forma de una desigualdad (desigualdad de Bell), válida bajo tres presupuestos:

1. Microobjetividad: las propiedades de las entidades microfísicas son independientes de su observación.
2. Validez de la inferencia inductiva.
3. Separabilidad o localidad de Einstein: ninguna influencia *entre dos objetos situados en lugares separados del espacio* pueden propagarse más rápidamente que la luz.

En 1969 se generalizó la desigualdad de Bell, de modo que fuera viable su comprobación experimental. Entre 1972 y 1976 se realizaron siete experimentos para comprobar si la desigualdad de Bell era violada, y lo era precisamente en la forma predicha por la MC. Se utilizaron fotones en seis de esos experimentos en lugar de protones, midiendo su polarización. Los resultados apoyaron en general la MC (ortodoxa), pero no de forma decisiva. El experimento de Aspect de 1982, mucho más preciso y concebido específicamente para examinar la no separabilidad, a diferencia de los anteriores, apoyó nuevamente y de modo decisivo la MC.<sup>21</sup>

La violación de la desigualdad de Bell no significa necesariamente que ya no sea posible una teoría de variables ocultas, como nota explícitamente D'Espagnat<sup>22</sup>. En efecto, la violación de esa desigualdad significa que al menos una de las hipótesis en que se basa su deducción no es válida, pero es imposible partiendo de los datos que conocemos saber cuál de ellas. Pero D'Espagnat, en trabajos más recientes, ha mostrado que la no separabilidad es “cosa probada”<sup>23</sup>, sin que la comunidad científica haya objetado sus argumentos<sup>24</sup>. Por ello, es claro que las nuevas teorías de variables ocultas u otras interpretaciones no ortodoxas han de ser no locales o no separables.

La no separabilidad no trae consigo el colapso de la Teoría de la Relatividad: las influencias que explican las “correlaciones a distancia”, y que se transmiten instantáneamente, no se pueden utilizar para transmitir señales<sup>25</sup>.

La valoración epistemológica de las interpretaciones realistas no es fácil; parece enteramente natural y justificado el rechazo al extraño sentido de realidad de la interpretación o interpretaciones ortodoxas. Los alegatos en contra de éstas se basan en asociar de alguna forma el sentido de realidad clásico con “el sentido común”: las condiciones y presupuestos mínimos de cualquier experiencia, no sólo lo cotidiana u ordinaria. La dificultad en desmontar esa asociación se muestra en el apego con el que los realistas científicos defienden sus posiciones.

Ante todo, aclaremos que “sentido común” y “sentido clásico de la realidad” no se implican mutuamente. El último presupone la opción metafísica del racionalismo cartesiano, sucesor de los de Parménides, Demócrito y Platón: la presunción humana en el poder de su razón, el pretender abarcar exhaustivamente *su realidad* mediante ideas claras y

distintas. La teoría física se concibe entonces como el descubrir, tras las apariencias sensibles, la verdadera realidad en su simplicidad última. No basta la mentalidad racionalista para explicar el arraigo del sentido clásico de realidad en los científicos apegados a él, que por lo general no son conscientes de la opción metafísica que lo sustenta; otros factores psicológicos y lingüísticos confluyen con esa mentalidad para dar lugar a la aparente necesidad lógica de la asociación mencionada en el anterior párrafo.

La ontología atomística realista no es pues una consecuencia ineludible de los resultados experimentales de la física. Ahora bien, el racionalismo es una opción metafísica cuyo desarrollo consistente conduce al idealismo<sup>26</sup>, polo opuesto del realismo en cualquiera de sus sentidos.

Es posible construir una epistemología no empirista y no racionalista, que sea realista en la acepción filosófica tradicional —esto es, acorde con el sentido común, tal como lo caracterizamos anteriormente—, y a la vez acorde con la MC?? En la próxima sección veremos que, efectivamente, es posible una vía media entre el empirismo y el racionalismo. Pero antes de ello, intentaremos mostrar, en contra del racionalismo, la incapacidad de nuestro intelecto de aprehender la realidad última de lo material, con ideas intuitivamente claras y distintas.

La realidad en sí, aunque parcialmente cognoscible como vimos al criticar el positivismo, no es completamente cognoscible, agotable exhaustivamente. La estabilidad dinámica que descubrimos en el mundo de nuestra experiencia, las regularidades que lo caracterizan, manifiesta una consistencia ontológica, inmanente en el fenómeno empírico. Precisar esa consistencia, esa inteligibilidad yacente en lo real sensible, nos conduce, tras una ardua investigación metafísica, a descubrir una “estructura inmaterial” en las cosas de nuestra experiencia cotidiana. La no separabilidad implica que tales cosas no son entes substanciales (con una existencia individual en sí mismas); son estructuras o “formas” materializadas, en un sentido afín al hilemórfico de Aristóteles: principios constitutivos de perfección específica esencial, de inteligibilidad, de actualidad<sup>27</sup>.

Conocemos las cosas porque poseemos “intencionalmente” sus formas, pero no por ello éstas son susceptibles de intelección analítica-intuitiva: no son reductibles a la suma de sus partes, en cuanto son una cierta totalidad inaprensible. Es imposible llegar a un conocimiento

intuitivo de las esencias, como advirtieron claramente Aristóteles y Tomás de Aquino<sup>28</sup>. Por tanto, los objetos de nuestra experiencia ordinaria y científica, desde las superestructuras cósmicas hasta las infraestructuras microfísicas, escapan siempre a nuestra comprensión exhaustiva. Estas limitaciones de nuestro conocimiento se agravan al emplear el método científico, que disecciona la realidad, analizándola en elementos más simples. Es verdad que estos argumentos no pueden considerarse conclusivos desde el punto de vista intracientífico; entre otras razones, porque se basan en una escogencia metafísica que, si bien es enteramente razonable y justificable, no es la única posible.

### III. INTERPRETACIONES EMPIRICO-RACIONALES

Bajo el nombre de “empirismo racional” comprendemos la orientación epistemológica de muchos autores actuales que se sitúan en medio de las dos tendencias extremas —empirismo o racionalismo— (aunque, por otra parte, algunos de ellos parecen acercarse más a una o a otra): N. Hartmann, K. Popper, F. Gonseth, G. Bachelard, J.L. Destouches, J. Ullmo, etc. No parece fuera de lugar relacionar con esta línea de pensamientos los grandes nombres de Born, Heisenberg o SCHRÖDINGER, cuyos textos, atentos a la complejidad del problema, son a menudo explotados por las diversas tendencias<sup>29</sup>.

Hay gran diversidad de opciones metafísicas entre los autores mencionados, y en consecuencia, sostienen posiciones divergentes en aspectos centrales. Sin embargo, siendo muy esquemáticos, podríamos caracterizarlos epistemológicamente por reconocer un valor cognoscitivo parcial a las construcciones teóricas representacionales (o no fenomenológicas) de la ciencia. Estas construcciones, como la palabra lo indica, “no son espejos donde se refleja la realidad tal cual es; más bien son redes abstractas construidas con modelos ideales, símbolos matemáticos y otros elementos que también son creación nuestra<sup>30</sup>”.

Estos constructos teóricos no son sin embargo, como quiere el positivismo, construcciones lógico-verbales sin “referente” extramental; tampoco describen, como quiere el racionalismo, la verdadera realidad tras las apariencias sensibles: no existe una realidad a un nivel más profundo que el dado sensiblemente. Representan *intelectualmente* el contenido inteligible inmanente en la experiencia; los modos concretos de

esa representación intelectual y de la inmanencia de lo inteligible en lo sensible se conciben por esos autores de maneras muy diversas. Los párrafos que siguen amplían la opción metafísica enunciada en los últimos párrafos de la anterior sección.

El mundo parcialmente subjetivo de nuestra experiencia (que podemos llamar "realidad empírica"), no es la realidad en sí: la realidad extramental independiente. Nuestra razón puede extraer del estudio de la realidad empírica un conocimiento cierto sobre la existencia de la realidad en sí y sobre *cómo no es*, y un conocimiento probable, limitado y aproximativo, de *cómo es*.

Con la frase "conocimiento probable, limitado y aproximativo" se quiere significar que nuestro conocimiento positivo de la realidad en sí nunca alcanzará un estado acabado, definitivo, absoluto; y no obstante, alcanzamos verdades objetivas, cada vez más profundas, a medida que avanza la ciencia y la filosofía. Lo probable se opone, en este contexto, a la certeza; pero en la práctica muy a menudo esa probabilidad puede tomarse como equivalente a la certeza.

La realidad empírica y la realidad en sí no están separadas; no se pueden entender al modo de las ideas platónicas. "Para comprender la verdad objetiva de un conocimiento parcialmente subjetivo, limitado por la naturaleza de las acciones que intervienen y de las condiciones del sujeto receptor, basta con evocar un símil elocuente: una fotografía en blanco y negro es una imagen verdadera y objetiva del objeto físico reproducido, si bien limitada y condicionada por la naturaleza propia del bromuro de plata<sup>31</sup>".

La consistencia ontológica de la realidad en sí, como mencionamos dos páginas atrás, causa la inteligibilidad intrínseca del fenómeno, de la realidad empírica. Las teorías científicas son mutables, por cuanto esa inteligibilidad es susceptible de asumir diversas concreciones intelectuales, de acuerdo a la técnica mediante la cual se explora la naturaleza (complementariedad?) y del formalismo matemático empleado. La construcción matemática de las teorías físicas es un reflejo del carácter relacional de los "entes científicos" sobre los que versan. Algunos de estos entes son "objetivables": susceptibles de ser cosificados, pensados como objetos con existencia en sí: campo (onda), partícula (electrón, átomo, etc.).

No se puede decir entonces que las entidades del mundo microfísico *existan en sí*, extramentalmente? No cabe duda que existen independientemente del hombre (a), pero se debe tomar la palabra "existir" en un sentido relajado: decididamente no son entes en el sentido del realismo clásico o local (entes con pleno derecho). Esa "existencia relajada" es *intermedia* entre la del *Ser-de-razón* —puramente intramental—, y la del *Ser-substancial*: la de los entes con plena subsistencia: total individualidad e independencia en el ser, tanto respecto a la mente como respecto a otros entes. La gradación del ser ya había sido notada por Aristóteles, a propósito del monismo de Parménides: el existir no se predica siempre en el mismo sentido<sup>33</sup>. Es lo que más tarde se llamaría la analogía del ente.

Como caracterizar con mayor precisión esa existencia, que podríamos llamar "cuasifantasmal", de las entidades microfísicas, que son algo material pero definitivamente no localizables en el espacio y el tiempo? Cómo se relacionan tales entidades con las entidades macroscópicas, cuya existencia objetiva, aunque tampoco sea substancial, es indudable (aunque no sea sino porque nos damos golpes contra ellas, como muchas veces se ha notado)? La respuesta a estas cuestiones metafísicas podría ser, presumiblemente, de carácter "holístico": el universo en que vivimos sería una única substancia (en sentido metafísico), y las estructuras que contiene, desde las de escala cósmica hasta las de escala microfísica, existirían como *partes de un todo*. Algo así como la mano existe como parte del cuerpo: una mano separada ya no es mano. De todos modos, no parece que quepa igualar el modo de existencia (extramental) de las entidades microfísicas y macroscópicas, aunque tanto unas como otras fundamentalmente son elementos de la realidad empírica. Las primeras tienen, si se nos permite expresarnos con alguna ligereza, un mayor "ingrediente mental", o subjetivo, que las segundas (que tampoco son, lo repetimos nuevamente, completamente objetivas). El desarrollo y fundamentación de éstas y similares ideas requerirá sin duda un complejo y sutil trabajo.

#### IV. INTERPRETACION DE BOHR

Situar a Bohr en el esquema epistemológico descrito en el presente trabajo no es tarea fácil, entre otras razones por su conocida reticencia a cualquier compromiso ontológico<sup>34</sup>. Su idea fundamental, la comple-

mentariedad, a primera vista parece susceptible de ser enmarcada en el marco epistemológico empirista-racional, como mencionamos incidentalmente en la página precedente. En la actualidad estamos realizando en la Universidad del Valle un estudio detallado sobre los aspectos ontológicos de la interpretación de Bohr. Se espera que el esclarecimiento de estos aspectos contribuya al objetivo de establecer un acuerdo sobre el significado de la MC.

#### APENDICE: Interpretación en mundos múltiples.

Propuesta por Hugh Everett III en 1957<sup>35</sup>, y desarrollada, entre otros, por Bryce De Witt<sup>36</sup>. Everett estableció como premisa epistemológica que el formalismo matemático de la MC define su propia interpretación. Igualmente, considera ese formalismo un espejo de la realidad: todos los elementos del formalismo tienen un correspondiente elemento en la realidad. Expondremos sucintamente esta interpretación. Jammer presenta un asequible resumen de su desarrollo matemático<sup>37</sup>.

Everett aplicó el formalismo de la MC al universo como una totalidad. Sean  $|E \lambda_1 \lambda_2 \dots\rangle$  los autoestados de hamiltoniano del universo, con autovalor de la energía  $E$  y con valores propios  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots$  de los observables que conmutan con este hamiltoniano. El estado cuántico del universo  $|X\rangle$  es expandible, de acuerdo con el principio de superposición, con la suma

$$|X\rangle = \sum_{E \lambda_1 \lambda_2} |E \lambda_1 \lambda_2 \dots\rangle$$

Everett piensa que cada uno de los estados propios  $|E \lambda_1 \lambda_2 \dots\rangle$  representa un mundo real y distinto. Concluye, según sus premisas, que "el mundo de nuestra experiencia —el universo que realmente percibimos— no es el único universo. Coexistiendo a su lado existen miles de millones de otros universos, algunos casi idénticos al nuestro, otros disparatadamente distintos, habitados por miríadas de copias casi exactas de nosotros mismos, que componen una gigantesca realidad multifoliada de mundos paralelos"<sup>38</sup>.

Cuando se efectúa una medición no se requiere la discutida "reducción de estado", o "colapso de la superposición". En lugar de ello, se "desconectan" o separan dos o más de esos múltiples mundos, en cada

uno de los cuales se obtiene uno de los posibles resultados de la medición. Esta interpretación surgió como un intento desesperado (por decir lo menos), de evitar esa problemática reducción de estado. No tiene ningún fundamento la disyuntiva que presenta Davies: "Como veremos, o bien se acepta la realidad múltiple de los mundos paralelos o bien se niega que el mundo real exista en absoluto, con independencia de nuestra percepción de él"<sup>39</sup>. Entre otras razones que se desprenden de nuestro trabajo, porque a pesar de los alegatos de De Witt, la interpretación no es consistente con sus propios presupuestos epistemológicos, como critica Ballentine<sup>40</sup>. Jammer<sup>37</sup> discute ésta y otras dificultades de la interpretación de Everett.

Esta interpretación puede catalogarse epistemológicamente como un "ultrarrealismo" de carácter platónico. Dejando aparte sus problemas de consistencia epistemológica interna, siguen siendo aplicables las críticas hechas anteriormente a la posición realista local.

#### AGRADECIMIENTOS

Agradezco al profesor Jairo Roldán por su colaboración en las discusiones que dieron forma a este artículo, y por su revisión del manuscrito.

#### REFERENCIAS

1. Bochenski, J.M. *Introducción al pensamiento filosófico*. Heder, Baelona, 1982. 115 pág. 23.
2. De Broglie, L. "Au-delà des mouvantes limites de la science". *Revue de métaphysique et de morale* 3, 278 (1947).
3. D'Espagnat, B. "The Quantum Theory and Reality" *Sci. Am.* Nov. 1979 pág. 158 - "Teoría cuántica y Realidad" *Investigación y Ciencia*, Enero 1980, págs. 88-95. Cita en pág. 80.
4. Aubert, J.M. *Filosofía de la Naturaleza*. Herder, Barcelona, 1981. 428 pág. 266.
5. Selvaggi, F. *Orientaciones actuales de la Física*. Troquel, Buenos Aires, 1961. 275 pág. 114.
6. Artigas, M.; J.J. Sanguinetti *Filosofía de la naturaleza* Eunsa, Pamplona, 1984. 226p nota 20, pág. 170.

7. Kemble, E.C. *The Fundamental Principles of Quantum mechanics*. McGraw-Hill, New York, 1937; Dover, New York, 1958.
8. Cfr. Kemble, E.C. "Operational reasoning, reality and quantum mechanics". *The Journal of the Franklin Institute*, 225, 263-275 (1938).
9. Rf (8), pág. 274.
10. Ref (7), pág. 328.
11. Feynman, R. *QED. The Strange Theory of Light and Matter* Princeton University Press, Princeton, 1985. pág. 124.
12. D'Espagnat, B. *Conceptual Foundations of Quantum Mechanics*, 2 ed. Benjamin, Reading USA, 1970. 297p pág. 249.
13. Citado por Davies, P. *Superfuerza*. Salvat, Barcelona, 1986. Cita en pág. 47.
14. Jammer, M. *The Philosophy of Quantum Mechanics* Wiley, New York, 1974. 536p.
15. M. Paty en *L'étrange histoire des quanta*. Citado por: Ferrero, M. et al *La teoría cuántica y la búsqueda de lo real. Una entrevista con Bernard D'Espagnat*. *Revista de Occidente*, 23 Abril (1983 págs. 85-93. Cita en la pág. 92).
16. Ref. (14) Secc. 7.7 págs. 302-312.
17. Ref. (12) págs. 75-157.
18. D'Espagnat, B. *A la recherche du réel* 2 ed. Gauthier-Villars, Paris, 1981.
19. "Nonseparability and the Tentative Descriptions of Reality". *Physics Reports*, 110, No. 4, pág. 202-264, North-Holland, Amsterdam (1984).
20. *Une incertaine réalité. Le monde quantique, la connaissance et la durée*. Gauthier-Villars, Paris, 1985.
21. Aspects, A; J. Dalibard; G. Roger. *Physical Review Letters*, 49, 1984 (1982).
22. Cfr. Ref. (15), pág. 91.
23. Ref. (20) pág. 116.
24. Cfr. ref (13), pág. 45 pág. 204.
25. Cfr. ref (3) pág. 95.
26. Ver, por ejemplo: Vernaux, R. *Epistemología General o Crítica del Conocimiento*. Herder, Barcelona, 1981. 249p. págs. 54-67.
27. Cfr. Ref. (14), nota 66 al Cap. VI. pág. 199. Vid también Ref. (5), pág. 244.

28. Cfr Ref (5), pág. 33.
29. Cfr ref (4), pág. 278 ss.
30. Agazzi, E.; M. Artigas; G. Radnitzky. "La fiabilidad de la ciencia". *Invest y Ciencia*, Noviembre 1986. págs. 66-74. Cita en pág. 66.
31. Ref (5), pág. 33.
32. Born, M. *Natural Philosophy of Cause and Chance*. Oxford University Press, London, 1949; Dover, New York, 1964. págs. 104-105.
33. Cfr. Grenet, P.B. *Historia de la Filosofía Antigua*. Herder, Barcelona, 1980. págs. 234-235.
34. Cfr Ref (12) pág. 256.
35. Everett, H. "Relative state formulation of quantum mechanics". *Reviews of Modern Physics* 29, 454 (1957).
36. DeWitt, B.S. "Quantum mechanics and reality" *Physics Today* 23 Sept. 1970 págs. 30-35.
37. Ref. (14) pág. 507ss.
38. Davies. P. *Otros mundos*. Salvat, Barcelona, 1986. pág. vii
39. Ibid pág. viii
40. Ballentine, L.E. "Can the statistical postulate of quantum theory be derived? - A critique of the many-universes interpretation". *Foundations of Physics* 3, 229 (1973).

## NOTA

"Aunque un electrón no se comporta en todos los aspectos como un grano de arena, se puede considerar tan real, pues tiene suficientes propiedades invariantes (masa, carga)" (Born (32)).

TEORIA CUANTICA  
ALGUNAS CONSECUENCIAS FILOSOFICAS,  
CIENTIFICAS Y TECNOLOGICAS

CICLO DE CONFERENCIAS EN  
EL CENTENARIO DE

ERWIN SCHRÖDINGER  
1887 - 1963

13

*JAIRO ROLDAN CH. Profesor Departamento de Física Facultad de Ciencias, Universidad del Valle, Cali - Colombia.*

LA REALIDAD FISICA  
PARA BOHR

13

JAIRO ROLDAN CH.

RESUMEN

Se presenta un análisis y una interpretación de las ideas de Niels Bohr acerca de la realidad física. Se concluye que, según las tesis de Bohr, ningún objeto físico, ni microscópico ni macroscópico, tiene una realidad en si o independiente. Se muestra que, sin embargo, el pensamiento de Bohr no se reduce ni a un puro subjetivismo ni a un idealismo, puesto que, para considerar la complementariedad como una solución a la paradoja cuántica, es necesario aceptar la existencia de una realidad exterior a nosotros, la cual estaría construida según el patrón complementario.

INTRODUCCION

Es bien conocido el debate sobre la interpretación física del formalismo cuántico que por varias décadas enfrentó a los fundadores de la Mecánica Cuántica, debate que aún no se ha cerrado y que ha retomado actualidad con los recientes desarrollos relacionados con el Teorema de Bell y la no-separabilidad. Por un lado los miembros de la llamada "escuela de Copenhague" quienes bajo, el liderazgo de Niels Bohr dieron una interpretación que, no obstante estar lejos de ser un todo monolítico y coherente dado que existen diferencias fundamentales

BOGOTA, OCTUBRE DE 1987

198

entre las versiones que de ella dieron sus creadores y en particular Bohr y Heisenberg<sup>1</sup>, es considerada por la inmensa mayoría de los físicos como la "interpretación ortodoxa" de la mecánica cuántica; y por otro lado, científicos como Einstein, Schrödinger y De Broglie, quienes buscaban una interpretación diferente basada en el realismo físico.

Puesto que el presente artículo es una colaboración a la celebración del centenario de ERWIN SCHRÖDINGER, uno de los creadores de la mecánica cuántica y uno de los grandes físicos de este siglo, hablaremos, muy someramente es verdad, de sus tesis fundamentales y de sus ideas acerca de la realidad. El propósito del artículo es, sin embargo, hacer un examen crítico de la concepción de realidad física de Bohr. Tal análisis es pertinente en una conmemoración de SCHRÖDINGER pues fue básicamente a la interpretación de Bohr de la mecánica cuántica a lo que se opuso SCHRÖDINGER toda su vida.

Dado que acerca de su idea de realidad física Bohr nunca fue explícito en sus escritos, nuestra presentación es necesariamente una interpretación de su pensamiento que a nuestro juicio le da a este último una coherencia manifiesta. Naturalmente existen diversas interpretaciones de Bohr y el debate está lejos de cerrarse si es que puede llegar a cerrarse jamás.

## EXPOSICION SOMERA DE LAS IDEAS DE SCHRODINGER

SCHRÖDINGER rechazó la idea de Bohr de la mecánica cuántica calificándola de mero ejercicio positivista y buscó una interpretación realista. Para él, el formalismo cuántico no es solamente una herramienta para calcular predicciones sino que, por el contrario, debe considerarse como una descripción objetiva de la naturaleza.

Su argumento acerca del gato que se encuentra en una superposición de un estado vivo y un estado muerto<sup>2</sup> puede considerarse como un intento de señalar la necesidad de un cambio en el formalismo cuántico. El argumento en cuestión, conocido también como "paradoja del gato", es en esencia el siguiente:

Se tiene una caja totalmente opaca e insonora de tal modo que sin abrirla no sea posible saber lo que pasa dentro de ella. La caja contiene un gato y un mecanismo. En una esquina de ella hay una ventana y un espejo semi-transparente sobre el cual incide un fotón que puede o

atravesar el espejo con un 50% de probabilidad o ser reflejado con un 50% de probabilidad. Si el fotón atraviesa el espejo desencadena el mecanismo que permite a un gas venenoso difundirse en la caja y matar al gato. Si se abre la caja hay entonces una probabilidad del 50% de encontrar el gato vivo y una probabilidad del 50% de hallarlo muerto.

Antes de la observación el sistema total: gato-mecanismo-fotón está representado por una función de onda  $\Psi$  que será una combinación lineal de una función  $\Psi_T$  que representa el sistema total cuando el fotón ha sido transmitido y una función  $\Psi_R$  que lo representa en el caso en que el fotón ha sido reflejado.

Si se considera que la función de onda representa el estado físico real del sistema, se debe concluir que, antes de abrir la caja, ésta última no contiene ni un gato vivo ni un gato muerto sino una superposición de ambas posibilidades.

Veremos más adelante la solución que da Bohr a la paradoja anterior. Solo debemos recalcar ahora que la paradoja se funda en la consideración de  $\Psi$  como algo que describe la realidad en sí.

SCHRÖDINGER considera que postular la existencia independiente de los cuerpos materiales regidos por las leyes físicas, no solamente ordena nuestras experiencias sino que refleja algo más allá de nuestras propias convenciones. Como lo dijimos antes, SCHRÖDINGER quería hallar una interpretación realista de la mecánica cuántica y hablaba de la realidad física de las ondas de la cuántica puesto que para él la primacía debía ir sobre la onda y no sobre la partícula.

SCHRÖDINGER sostiene en sus escritos de tipo metafísico<sup>3</sup>, en los cuales expone sus ideas acerca de la realidad, que la dicotomía entre espíritu y materia es finalmente artificial puesto que el mundo real que nos rodea y nosotros mismos estamos compuestos de los mismos materiales pero ordenados en forma diferente. Según él, para ir de espíritu a materia y viceversa hay que separarlos elementos y reorganizarlos en un orden diferente. La dificultad de hallar un lugar para el espíritu en la imagen científica del mundo radica, dice Schrödinger, precisamente en el hecho de que materia y espíritu constan de los mismos elementos.

SCHRÖDINGER sostiene también que la multitud de sujetos, cada uno con sus propios pensamientos, es finalmente una ilusión ya que sólo existe un solo Espíritu.

Shimony<sup>4</sup> hace notar que en sus escritos metafísicos SCHRÖDINGER no hace uso ni de los resultados de la física ni de sus análisis filosóficos acerca de la misma, y afirma que la explicación de ello está en la tesis de SCHRÖDINGER según la cual la ciencia se funda en la "objetivación", descrita por el mismo SCHRÖDINGER en párrafos como este:

"Sin percatarnos de ello y sin ser rigurosamente sistemáticos acerca de ello, excluimos el Sujeto que conoce del dominio de la naturaleza que queremos entender. Nuestra propia persona retrocede haciéndose parte de un observador que no pertenece al mundo, el cual por medio precisamente de este procedimiento se convierte en un mundo objetivo<sup>5</sup>".

Sin embargo los problemas filosóficos más profundos tratan de ese mismo sujeto que SCHRÖDINGER excluye de la imagen científica del mundo.

Es claro entonces el contraste entre la tesis de SCHRÖDINGER acerca de la interpretación realista de la mecánica cuántica y sus ideas acerca de la realidad, según las cuales mente y materia están compuestos de los mismos elementos. Shimony<sup>4</sup> afirma que debe considerarse como básicamente idealista este tipo de metafísica propuesta por SCHRÖDINGER.

Sería interesante llevar a cabo un análisis crítico de las ideas de Schrödinger para ver si es posible integrar en un todo coherente sus ideas sobre la interpretación de la cuántica y sus tesis acerca de la realidad y la apariencia.

## LA CIENCIA Y EL PAPEL DEL LENGUAJE COMUN SEGUN BOHR

El aspecto quizás más sutil del pensamiento de Bohr, y que puede verse como una síntesis de sus ideas, en su concepción de la realidad física. Para entender esa concepción es necesario primero tener en cuenta sus consideraciones acerca de la meta de la ciencia y del papel que juega el lenguaje común en esta última.

Según Bohr<sup>6</sup> la ciencia tiene como objetivo el ordenamiento y el aumento de la experiencia humana comunicable sin ambigüedad. Sólo cuando la experiencia puede comunicarse sin ambigüedad, sin referencia explícita a un observador individual, puede decirse que es objetiva. Un

científico realista como SCHRÖDINGER aceptará la anterior caracterización de la ciencia en tanto que metodología a través de la cual se puede llegar a conocer la realidad en sí. Para Bohr, en cambio, la meta *exclusiva* de la ciencia es el conocimiento no de la naturaleza sino de aquello que podemos decir sobre la naturaleza. A pesar de que una primera mirada daría como conclusión que la tesis de Bohr se reduce finalmente a un puro positivismo, un análisis más profundo de todo el pensamiento de Bohr permite encontrar varios puntos de demarcación entre él y los positivistas<sup>7</sup>. A lo largo de este trabajo esperamos mostrar como la línea de pensamiento que lleva a Bohr a su conclusión acerca de la ciencia difiere totalmente de la de los positivistas.

Para Bohr la ciencia es entonces básicamente un asunto de comunicación, de allí la importancia que da al estudio cuidadoso de las condiciones que permiten el uso sin ambigüedad de los conceptos. Un lenguaje que pueda usarse sin ambigüedad es fundamental en la concepción bohriana de la ciencia.

¿Cuál es según Bohr ese lenguaje? Bohr sostiene que el *único* lenguaje que es susceptible de emplearse sin ambigüedad es el lenguaje común suficientemente refinado. Los elementos del lenguaje corriente necesarios, según él, para dar cuenta de toda experiencia física objetiva son: la *localización* espacio-temporal y la *causalidad* entendida como *determinismo*.

Hay que aclarar que Bohr acepta que el lenguaje común tal como se presenta está lleno de ambigüedades. Su tesis es que tal lenguaje puede llegar a usarse sin ambigüedad si se determinan sin equívoco las circunstancias que permiten el uso de cada concepto.

Su tesis del lenguaje común como el *único* que puede llegar a utilizarse sin ambigüedad; tesis que hemos denominado la *unicidad del lenguaje común*; confrontada con su análisis de las regularidades cuánticas según el cual tales regularidades no pueden explicarse por medio del lenguaje común, da lugar a la llamada paradoja cuántica fundamental.

## LA PARADOJA CUANTICA

No repetiremos aquí el conocido dilema de la dualidad onda-partícula, que no puede explicarse por medio de la física clásica y que es uno de los hechos que llevan a Bohr a convencerse de la imposibilidad

de explicar la existencia del quantum de acción  $h$  en base al lenguaje clásico. Más bien haremos mención de otro argumento presentado por Bohr acerca de la imposibilidad mencionada y que es la estabilidad misma de la materia.

Bohr observa que la estabilidad de un átomo es de un tipo totalmente diferente a la de un sistema clásico como el sistema solar puesto que, a pesar de que éste último muestra un alto grado de armonía y estabilidad, nada impide que, en principio, su movimiento se altere total y permanentemente por la acción de una fuerza exterior apropiada. En cambio, para explicar las propiedades físicas y químicas de los elementos, se precisa una estabilidad de los átomos tal que el estado original del sistema se recupere completamente y por sí mismo después de la acción de una fuerza exterior.

Por otra parte, añade Bohr, es el quantum de acción  $h$  lo que finalmente explica la estabilidad de la materia, estabilidad sobre la cual se basa de manera esencial la descripción mecánica de todo fenómeno natural.

En conclusión, según Bohr, el quantum de acción es algo que no puede explicarse con el lenguaje clásico y como ese lenguaje, que es sólo un refinamiento del lenguaje común, es el único que poseemos y que poseeremos siempre, debemos aceptar el quantum de acción como algo que no se explica ni que requiere explicación.

Una vez aceptada sin explicación la existencia de  $h$ , es necesario encontrar y analizar las consecuencias que se derivan de tal aceptación. Entre ellas están: el carácter de *totalidad* de los procesos atómicos y la *indivisibilidad* del objeto y el instrumento de observación.

Según Bohr, la existencia de  $h$  confiere a los procesos atómicos un carácter de *totalidad* que se manifiesta por el hecho de que toda subdivisión del fenómeno exigirá una modificación del dispositivo experimental, que producirá nuevos efectos y que será incompatible con la definición del fenómeno que se estudia. El conocido fenómeno de interferencia de la luz ilustra este carácter de totalidad: Si un haz de luz, o sea de fotones, pasa por dos rendijas y llega luego a una pantalla, se obtienen las conocidas franjas de interferencia. Si queremos *subdividir* el fenómeno y conocer por cuál rendija pasa cada fotón y añadimos un dispositivo que nos permita saberlo, se destruyen entonces las figuras de interferencia. El nuevo aparataje experimental será incompatible con la definición del fenómeno de interferencia.

De hechos como el anterior se deduce que es imposible ahora mantener la separación estricta, que existe en la concepción mecánica de la naturaleza, entre el objeto observado y el instrumento de observación. Existe entonces una *indivisibilidad* entre ambos. Todo fenómeno cuántico depende del dispositivo experimental: Un arreglo adecuado para observar las franjas de interferencia no permite decidir por cuál rendija pasan los fotones y, recíprocamente, un dispositivo mediante el cual es posible observar por cuál rendija pasan los fotones impide la aparición de las franjas de interferencia. La existencia de  $h$  no permite definir con precisión, en un fenómeno cuántico, la interacción entre el objeto y el aparato de observación.

Para Bohr todo el lenguaje corriente se hace inadecuado para dar cuenta de las regularidades cuánticas. De hecho, aún la misma palabra objeto se hace ambigua si se la usa para explicar un fenómeno cuántico. Y, en general, toda atribución de cualidades físicas habituales a los objetos atómicos es ambigua. Se debe hablar ahora de la *totalidad* del fenómeno cuántico, incluido el instrumento de medida.

Si se acepta el análisis de Bohr, hay que concluir que el uso de la palabra "objeto", y de todas aquellas palabras que se refieren a las propiedades de un objeto clásico, para referirse a un electrón no es más que una convención, ya que sería incomodo, por ejemplo, escribir un artículo científico refiriéndose en cada momento al aparataje experimental.

Ahora bien, si el lenguaje corriente es el único que permite la no ambigüedad o sea la objetividad, y tal lenguaje se vuelve ambigüo si se lo usa para explicar las regularidades cuánticas, entonces: ¿Cómo podemos referirnos sin ambigüedad a un fenómeno cuántico?

Para resolver la paradoja anterior, Bohr propone una nueva manera de emplear el lenguaje común: el modo complementario de descripción o complementariedad.

El modo complementario de descripción es una nueva relación lógica entre los conceptos del lenguaje corriente. Bohr lo propone como un desarrollo racional del lenguaje común, como una manera de amplificar ese marco conceptual de modo se sea posible expresar experiencias que están fuera del campo de validez del lenguaje corriente, sin que haya necesidad de abandonar éste último.

## DEFINICION DE COMPLEMENTARIDAD

Una de las críticas más fuertes que se han hecho a Bohr es la de no haber dado en sus escritos una definición precisa de la complementariedad. El mismo Einstein confesaba que, a pesar de muchos esfuerzos, no había logrado llegar a una formulación precisa de ella<sup>8</sup>. Si se analizan los presupuestos filosóficos de Einstein, diametralmente opuestos a los de Bohr, se puede entender la situación anterior, puesto que sólo es posible comprender el modo complementario de descripción si se parte de los presupuestos básicos de Bohr. A esto se añade el hecho de que Bohr nunca expresó esos presupuestos de manera manifiestamente coherente ni completa en sus escritos.

Nosotros proponemos como una definición precisa de la complementariedad las siguientes proposiciones.

## EL USO DE LOS CONCEPTOS

El uso de un concepto se define únicamente por medio de una experiencia concreta. Definir el uso de un concepto quiere decir preguntarse si es posible o no utilizarlo en la experiencia en cuestión.

Un haz de fotones que pasa por dos rendijas y que luego llega una pantalla donde se forma un patrón de interferencia es un ejemplo de una experiencia que define el uso de la palabra *onda*. Por el contrario, si se añade un dispositivo para conocer por dónde pasa cada fotón, la experiencia permite el uso del concepto de *partícula*, pero no del de *onda* pues desaparece la interferencia.

Una experiencia para medir con *precisión* la posición de un *electrón* permite el uso de ese concepto de posición pero, como es imposible conocer con tal experiencia el momento, ella no permite el uso de este último concepto. De igual modo, una experiencia para medir con *precisión* el momento del *electrón* permite el uso de ese concepto pero no del de posición. Si pudieramos combinar en una sola experiencia los dispositivos para medir con *precisión* el momento y la posición del *electrón* podríamos utilizar ambos conceptos a la vez.

Es el caso con una partícula clásica pues, en principio, es posible tener un mismo dispositivo experimental para medir a la vez con *precisión* su posición y su momento.

## CONCEPTOS MUTUAMENTE EXCLUYENTES

Dos conceptos son mutuamente excluyentes si no existe ninguna posibilidad de definir su uso por medio de una sola experiencia. No es posible combinar en una sola imagen conceptual dos conceptos mutuamente excluyentes.

Así, los conceptos de onda y partícula son mutuamente excluyentes. Igual lo son los de posición y momento *precisos* para un *electrón*, por ello no pueden combinarse en una sola imagen mental: la de trayectoria. En cambio, si pueden combinarse cuando se trata de un objeto clásico.

## CONCEPTOS COMPLEMENTARIOS

Dos conceptos son complementarios si son mutuamente excluyentes pero ambos necesarios para agotar toda la información precisa sobre un objeto.

De nuevo, los conceptos de onda y de partícula y los de posición y momento *precisos* son conceptos complementarios respecto al *electrón*.

## EXPERIENCIAS, VARIABLES Y DESCRIPCIONES COMPLEMENTARIAS

Experiencias complementarias son aquellas por medio de las cuales se definen los conceptos complementarios. Variables complementarias son aquellas mediante las cuales se representan los conceptos complementarios, y descripciones complementarias de un mismo fenómeno no son aquellas hechas con conceptos complementarios.

## EL MODO NORMAL DE DESCRIPCION

Es la manera como se utiliza el lenguaje común en la vida ordinaria.

## EL MODO COMPLEMENTARIO DE DESCRIPCION O COMPLEMENTARIDAD

Es la manera de utilizar el lenguaje corriente por medio de conceptos complementarios.

Hay que recalcar que lo que decide, en el modo complementario de descripción, si es posible o no de combinar dos conceptos en una sola imagen conceptual, son las experiencias por medio de las cuales uno define el uso de los conceptos en cuestión, y la existencia o no de la posibilidad de combinar en uno solo los dispositivos de medida correspondientes.

Todas las variables sometidas a una relación de incertidumbre corresponden a conceptos complementarios. En cambio hay conceptos complementarios, tales como los de onda y partícula, que no se manifiestan bajo la forma de relaciones de incertidumbre.

Por qué razón y bajo qué presupuestos la complementariedad resuelve las paradojas cuánticas se verá más claramente al estudiar el concepto de realidad para Bohr. Solo diremos por el momento que, a pesar de lo que un primer análisis sugiere, la complementariedad, dentro del contexto de pensamiento de Bohr, no debe considerarse como algo puramente lingüístico, sino que hace referencia a una realidad externa a nosotros pero no independiente de nosotros.

## EL USO NO AMBIGUO DE LA PALABRA REALIDAD

En coherencia con sus ideas acerca del empleo sin ambigüedad del lenguaje, Bohr sostiene que la "realidad física" es una expresión que debemos aprender a utilizar sin ambigüedad.

En su respuesta<sup>9</sup> a las objeciones de Einstein, manifestadas por éste en su famoso artículo de 1935<sup>10</sup>, Bohr explica la manera como, a su juicio, debe emplearse la palabra "realidad" de manera consistente y sin ambigüedad.

En su artículo, Einstein había propuesto como criterio suficiente para aceptar que una cantidad física corresponde a un elemento de la realidad física, el hecho de poder predecir con certeza el valor de tal cantidad sin perturbar en modo alguno el sistema al cual se refiere la cantidad en cuestión.

Con base en el "criterio de realidad" anterior, Einstein presentó un ejemplo particular según el cual se demostraría que la teoría cuántica era una teoría incompleta.

El ejemplo de Einstein es el siguiente: Consideremos un sistema compuesto por dos partículas. Llamemos  $q_1$  y  $p_1$  la coordenada y el momento lineal de una de las partículas en una dirección dada y  $q_2$  y  $p_2$  las correspondientes coordenadas y momento lineal de la otra partícula en la misma dirección. Se puede probar fácilmente que  $(p_1 + p_2, q_1 - q_2) = 0$  y por tanto, según el formalismo cuántico, es posible conocer a la vez y con certeza las dos cantidades  $p_1 + p_2$  y  $q_1 - q_2$ . Si se mide  $q_1$  con la precisión que se quiera es entonces posible conocer  $q_2$  con la precisión que se quiera y si las medidas se hacen en un instante cuando la interacción entre las dos partículas ha prácticamente finalizado, de tal modo que se les puede considerar como libres, se tendrá la posibilidad de predecir con certeza al valor de  $q_2$  *sin perturbar en modo alguno la segunda partícula*. Por un razonamiento similar se concluye también que es posible predecir con certeza el valor de  $p_2$ , *sin perturbar tampoco en modo alguno la segunda partícula*.

Según el criterio de realidad de Einstein se debe asignar un elemento de realidad a  $q_2$  y a  $p_2$  y, dado que el formalismo cuántico no permite asignar un valor preciso (scharp) a ambas variables, debemos concluir que la descripción cuántica es incompleta.

Bohr responde que hay una ambigüedad en la frase "sin perturbar en modo alguno la segunda partícula". Para mostrar la ambigüedad Bohr presenta un arreglo experimental adecuado a la situación.

Se trata de un diafragma con dos rendijas paralelas muy estrechas en relación con su superación  $\lambda$ . Dos partículas 1 y 2 pasan de manera independiente cada una por una rendija. El momento  $p_1$  y  $p_2$  de las partículas es conocido.

Si se mide el momento del diafragma antes y después del paso de las partículas, es posible conocer la suma del momento de las partículas en la dirección de las rendijas después de que pasan por ellas. Llamemos  $Z$  tal dirección; la distancia entre las rendijas nos da la diferencia entre las coordenadas de las partículas en la misma dirección. Se tendrá entonces las cantidades  $p_1 z + p_2 z$  y  $Z_2 - Z_1$ . Podemos luego proceder sea a medir  $Z_1$  para conocer  $Z_2$ , sea a medir  $p_1 z$  para conocer  $p_2 z$ .

Para Bohr las dos posibles experiencias constituyen:

"Una discriminación entre dos procedimientos experimentales diferentes que permiten el uso no ambiguo de conceptos clásicos complementarios<sup>11</sup>".

El significado de la cita anterior se entiende analizando las dos posibles experiencias en cuestión:

#### EXPERIENCIA A:

Se mide  $Z_1$  y se conoce en consecuencia  $Z_2$ . Ahora bien, según lo expresan las relaciones de Heisenberg, habría un cambio incontrolable de momento entre la partícula 1 y el instrumento de medida. Por tanto, una medida ulterior del momento  $p_2 z$  no nos permitirá conocer  $p_2 z$ . Para ello sería necesario conocer la cantidad de momento intercambiado entre la partícula 1 y el instrumento con que se mide  $Z_1$ , intercambio que no podemos conocer.

#### EXPERIENCIA B:

Se mide  $p_1 z$  y se puede entonces conocer  $p_2 z$ . A causa de la interacción entre la partícula 1 y el instrumento empleado para conocer su momento en dirección  $z$ , habrá un desplazamiento incontrolable de la posición, tal como lo expresan cuantitativamente las relaciones de Heisenberg. En consecuencia, una medida posterior de la posición de la partícula 1 no nos permitirá ahora conocer la posición de la partícula 2.

La conclusión inmediata de Bohr es que las condiciones de la experiencia A nos permiten usar el concepto de posición precisa de la partícula 2 pero no el concepto de momento preciso de esa partícula. Según sus propias palabras, las condiciones de la experiencia nos hacen perder la posibilidad de una:

“... aplicación sin ambigüedad de la idea de momento en las predicciones que conciernen el comportamiento de la segunda partícula<sup>12</sup>”.

De manera similar las condiciones de la experiencia nos permiten el uso sin ambigüedad de la idea de momento de la partícula 2 pero no nos permiten el uso de la idea de posición precisa de una partícula o, como dice textualmente Bohr, nos dejan sin base alguna

“... para las predicciones que conciernen la posición de ... partícula<sup>13</sup>”.

En conclusión, cuando hacemos una medida de  $q_1$  o de  $p_1 z$  y en consecuencia de  $q_2$  y  $p_2 z$  respectivamente, aún si no existe ninguna interacción directa con la partícula 2, hay en cambio una influencia sobre las condiciones que definen los tipos posibles de predicciones con respecto al comportamiento futuro de esa partícula. En eso consiste, según Bohr, la ambigüedad de la frase “sin perturbar en modo alguno el sistema”:

“Evidentemente, no se trata en modo alguno en tal caso de una perturbación mecánica del sistema estudiado durante la última etapa crítica del proceso de medida. Pero aún en esa etapa se trata de una influencia sobre las condiciones mismas que definen los tipos posibles de predicciones relativas al comportamiento futuro del sistema. Como esas condiciones constituyen un elemento inherente en la descripción de todo fenómeno al cual se pueda propiamente asignar el término “realidad física”, vemos que la argumentación de los autores mencionados no justifica su conclusión de que la descripción de la mecánica cuántica es esencialmente incompleta<sup>14</sup>”.

En el último párrafo de la cita está formulado lo que podemos considerar como el criterio de realidad de Bohr: Todo fenómeno al que se pueda asignar sin ambigüedad la expresión realidad física, debe contener, como elemento inherente, las condiciones que definen los tipos de predicciones que es posible hacer acerca del comportamiento futuro del sistema en cuestión. O sea: para hablar de realidad física de un fenómeno es inevitable tomar en cuenta todo el arreglo experimental. En la situación descrita por Einstein, no es entonces posible hablar de la realidad física de  $q_2$  sin describir el arreglo experimental para medir  $q_2$ . Y lo mismo para  $p_2$ .

Con base en lo que hemos dicho hasta ahora analizamos el concepto de realidad de Bohr.

#### EL INTERIOR DEL FENOMENO

Estudiemos de nuevo la manera como se debe usar, dentro del contexto de la tesis de Bohr, la palabra objeto para referirse a un electrón o a un fotón.

Dijimos antes que la existencia del quantum de acción implicaba que no era posible asignar a un electrón las propiedades físicas habitua-

les de un objeto clásico, el cual se considera como independiente del sujeto que lo observa y con propiedades que le pertenecen exclusivamente. Un fenómeno cuántico, según Bohr, es un *todo* que no puede dividirse y por ello se debe cada vez especificar esa *totalidad* incluido el aparataje experimental. Hablar de un "objeto" y atribuirle propiedades independientes, en el caso de un fenómeno cuántico no es más que una convención cómoda.

Hay otra razón, sin embargo, que justifica usar, con las debidas reservas, la palabra objeto al referirse a un fenómeno cuántico, y es la siguiente: según Bohr, en cada experiencia debemos hacer una diferencia esencial entre el instrumento, el cual se describe por el lenguaje corriente en su modo normal de descripción, y el resto del fenómeno, que podemos llamar "objeto", el cual no se puede describir con el modo normal de descripción sino que debe describirse en el modo complementario de descripción.

En toda experiencia es entonces posible identificar el instrumento y el "objeto", pero la frontera entre ambos cambia con cada experiencia. Podemos entonces utilizar la palabra "objeto" pero sin atribuirle un sentido ontológico o sea sin referirla a una realidad independiente. Es decir, el lenguaje debe utilizarse, según se concluye de las tesis de Bohr, sin el contenido ontológico clásico, que considera los objetos como independientes y con propiedades que les pertenecen exclusivamente.

Nosotros proponemos, como una mejor manera de hablar, el distinguir entre el instrumento y el "interior" del fenómeno, considerando el "interior" como aquel aspecto del fenómeno que no es directamente accesible a nuestros sentidos y que solo es manifiesto de manera indirecta, a través de efectos irreversibles de amplificación producidos en el instrumento. Por ejemplo: La marca dejada en una placa fotográfica es el efecto irreversible de amplificación que puede indicar la presencia un electrón. Este efecto irreversible de amplificación es llamado por Bohr la "clausura" del fenómeno.

### LA EXISTENCIA DE UN OBJETO CLASICO

Ahora bien, pensemos de nuevo en el caso de un haz de electrones sometido a dos experiencias complementarias que permitan definir los conceptos complementarios de onda y de partícula. Hemos dicho que

los dos conceptos son necesarios para agotar toda la información posible sobre el mismo "objeto" o "interior": Un haz de electrones. ¿Podemos decir entonces que el "objeto" tiene al menos una propiedad independiente del instrumento y que se trata de su existencia misma?

Bohr mismo ni formuló ni dió respuesta a esta pregunta en sus escritos. No obstante es posible responderla de manera coherente con sus ideas. Para ello debemos salir del marco de la mecánica cuántica no relativística y recordar algunos resultados de la teoría cuántica de campos<sup>15</sup>. En la electrodinámica cuántica la intensidad de los campos eléctrico y magnético y el número de fotones son operadores que en general no conmutan. En consecuencia, el campo electromagnético y el número de fotones son variables complementarias: Una experiencia que permite precisar el número de fotones es mutuamente excluyente con una que permite medir con precisión el valor del campo electromagnético. No podemos entonces hablar sin ambigüedad del número de fotones, o sea hablar de la "existencia" de tantos fotones sin hacer referencia a una experiencia física concreta.

Igual sucede con el campo "protónico": Un arreglo adecuado para medir la distribución espacial de la carga implica una creación incontrollable de pares electrón-protón. La distribución espacial de la carga y el número de partículas en juego son variables complementarias.

En los ejemplos considerados no podemos hablar del número de partículas existentes en el fenómeno sin tener en cuenta el dispositivo experimental total. Y esta situación es general: en la teoría cuántica de los campos la partícula no es más que una manifestación de los campos cuánticos, los cuales son operadores, variables físicas del mismo tipo que  $p$  o  $q$  en la mecánica cuántica no relativística. O sea que las partículas y los campos serán propiedades. ¿Propiedades de qué? Una respuesta puede ser: Propiedades de aquello que describen los vectores de estado, que son una generalización de la función de onda de la cuántica no relativística. Ahora bien, para Bohr en coherencia con su consideración de las matemáticas solo como un refinamiento del lenguaje común, la función de onda no tiene una realidad física, e igual se puede entonces decir del vector de estado de la teoría de los campos.

En conclusión, podemos decir que según las tesis de Bohr todas las propiedades de un objeto cuántico, incluida su existencia, son propiedades dependientes.

## LA EXISTENCIA DE LOS CUERPOS MACROSCOPICOS

¿Cómo debe considerarse la existencia de los cuerpos macroscópicos? Al igual que sucede con la pregunta acerca de la existencia de un objeto cuántico, en ninguna parte de los escritos de Bohr puede encontrarse ni la formulación ni la respuesta a la cuestión de la existencia de los cuerpos microscópicos. Sin embargo, a partir de sus diferentes tesis es posible dar una respuesta coherente con su pensamiento.

En primer lugar, hay que anotar que, si Bohr concibiera los elementos del mundo macroscópico como poseyendo una realidad independiente, se enfrentaría, según la conclusión a que llegamos en la sección anterior acerca de la existencia de un objeto cuántico, a muchos problemas, de los cuáles el más evidente es que finalmente un cuerpo macroscópico se concibe como formado por cuerpos microscópicos, y sería difícil sostener que un objeto tiene cualidades independientes mientras sus componentes no tienen propiedades en sí.

Ahora bien, según Bohr, lo que decide si un objeto es o no cuántico no es su naturaleza macroscópica sino las acciones físicas puestas en juego en relación al objeto.

Si las circunstancias son tales que las acciones físicas en juego con relación a un objeto son mucho mayores que  $h$ , el objeto se puede describir por el lenguaje ordinario en su modo normal de descripción y podemos referirnos a él atribuyéndole la idea ordinaria de realidad física, es decir: en sí o independientemente. Es el caso con los instrumentos de medida o con los objetos macroscópicos en las circunstancias de la vida ordinaria. Si, por el contrario, las acciones en juego con relación a un objeto son del orden de  $h$ , el objeto debe considerarse como cuántico aún si es *macroscópico*.

Es el caso, discutido por Bohr<sup>16</sup>, de un diafragma macroscópico que es considerado en unas circunstancias como objeto clásico y en otras como objeto cuántico según sea la acción en juego respecto a él.

Ahora bien, en determinadas circunstancias el objeto macroscópico debe considerarse como objeto cuántico, como "interior" de un fenómeno cuántico; eso significa que en tales circunstancias debe considerarse como desprovisto de propiedades en sí, incluida su existencia. O sea: en ciertas circunstancias un objeto macroscópico puede describirse

como teniendo propiedades en sí y en otras como teniendo propiedades dependientes, incluso su existencia. En otras palabras su existencia en sí dependería de las circunstancias o más precisamente de las acciones puestas en juego con relación a él.

El claro entonces que sus propiedades y su existencia, no son entonces independientes, puesto que dependen de las acciones físicas en juego.

La conclusión ineludible de nuestro análisis es entonces la siguiente: *Según las tesis de Bohr ningún objeto físico tiene propiedades independientes o en sí, incluida su existencia.*

La conclusión anterior genera de inmediato preguntas como las siguientes:

¿Los objetos que miramos en la sala continúan existiendo si abandonamos la sala?

¿Si todos los habitantes de París dejan la ciudad, continuará ella existiendo?

¿Existía la estrella antes de que su luz arrivara a los ojos del primer hombre que la observó?

Para ser coherente con las tesis de Bohr, tal como las interpretamos en este trabajo, habría que contestar que las preguntas anteriores no tienen sentido puesto que no se define ninguna situación experimental que permita responderlas.

Parece que no existe ningún escrito de Bohr que permita decir cuál hubiera sido la respuesta de Bohr a tales preguntas. Y parece que Bohr siempre rehuzó hablar de cuestiones que, como las anteriores, son de tipo ontológico.

Existe, sin embargo, una cita donde puede uno encontrar la razón de este rechazo implícito de Bohr a todo tipo de ontología.

"Ya que se habla a menudo, en la literatura filosófica de diferentes niveles de objetividad, de subjetividad o aún de realidad, podemos señalar aquí que la noción de un sujeto último —al igual que los conceptos de realismo e idealismo— no tienen lugar en una descripción objetiva tal como la hemos definido<sup>17</sup>".

A nuestro juicio, la cita entera debe entenderse en el sentido de que para hablar de ontología y de conceptos como los de realismo e idealismo, es necesario tener una frontera fija entre el sujeto y el objeto, o

sea, es necesario definir un sujeto o un objeto últimos. Dado que en un fenómeno cuántico, según Bohr, no hay un sujeto último puesto que la frontera entre sujeto y objeto es cambiante y arbitraria, se concluye que ninguna ontología tiene lugar en un fenómeno cuántico.

Antes de proceder a un análisis crítico de este rechazo de Bohr a toda ontología examinando mejor los presupuestos metafísicos en que se basan sus tesis, es necesario aclarar algunos posibles equívocos, como sería pensar que la tesis de Bohr finalmente se reduce a un puro idealismo o que se trata solamente de un enfoque puramente lingüístico.

### REALIDAD EXTERIOR PERO NO INDEPENDIENTE

La tesis de Bohr según la cual ninguna ontología tiene lugar en un fenómeno cuántico no debe entenderse en el sentido de una adherencia al *enfoque puramente lingüístico*, que consiste en sostener que la ciencia no es más que un discurso sobre nuestras propias impresiones intersubjetivas, un discurso hecho por los hombres y cuya meta es finalmente ellos mismos y los otros hombres.

En nuestra opinión la tesis de Bohr es mucho más sutil que eso. En efecto, Bohr afirma que la meta de la ciencia es la descripción de nuestra experiencia sobre la naturaleza, sobre lo que podemos decir sobre la naturaleza. Bohr no afirma entonces que se trate de describir exclusivamente nuestras propias impresiones intersubjetivas o que se trate de un discurso exclusivamente sobre nosotros mismos. Por una parte el discurso científico es sobre nosotros mismos en la medida en que se refiere a *nuestro conocimiento* pero de otra parte no es sobre nosotros mismos en la medida en que se refiere a nuestro conocimiento de la *naturaleza*.

En varios de sus ensayos<sup>18</sup>, Bohr se refiere a nuestra posición como observadores de esa naturaleza de la que nosotros mismos hacemos parte.

Encontramos aquí una aparente contradicción entre esta referencia de Bohr a la naturaleza y su rechazo a toda ontología que pueda sustentar los fenómenos cuánticos. Para resolver la contradicción debemos hacer referencia a los dos tipos de objetividad identificados por D'Espagnat<sup>19</sup>: La objetividad fuerte y la objetividad débil.

**Objetividad fuerte:** Un enunciado será objetivo si no contiene ninguna referencia, *ni siquiera implícita*, a la colectividad de los observadores. Este tipo de objetividad se refiere a la realidad en sí: serán objetivas aquellas afirmaciones que se refieren a tal realidad.

**Objetividad débil:** o intersubjetividad: un enunciado puede hacer referencia al observador *en general* y ser objetivo siempre y cuando sea considerado como verdadero para no importa qué observador. El criterio de objetividad débil es el acuerdo intersubjetivo entre aquellos que comunican.

La contradicción mencionada se puede resolver si consideramos, por una parte, que el rechazo a buscar una ontología que pueda estar de acuerdo con los fenómenos cuánticos significa para Bohr simplemente que una descripción con base en la objetividad fuerte no puede llevarse a cabo en el dominio cuántico, y por otra parte, que el uso de la palabra "naturaleza" es hecho por Bohr para referirse a la realidad *exterior a nosotros*, la cual, si bien no es independiente de nosotros, está sin embargo *fuera de nosotros*. A nuestro juicio, aquello de lo que hablamos en una descripción cuántica no es para Bohr exclusivamente nuestras propias experiencias; existe, en un sentido débil del verbo, una realidad a la que hacemos referencia con nuestro lenguaje. Esta realidad, llamada naturaleza por Bohr, no es la realidad en sí, y lo que es más significativo, según el mismo Bohr ninguna referencia a una realidad independiente tiene lugar en una descripción cuántica.

Las consideraciones anteriores se pueden reforzar por el hecho de que para Bohr un fenómeno cuántico se "cierra" o se "clausura" por medio de un efecto irreversible de amplificación, que no exige que una conciencia esté o no presente para registrar esa manifestación del "interior" del fenómeno o del "objeto" cuántico. El observador es necesario para definir el aspecto del fenómeno que se va a manifestar, y ese observador no tiene derecho a afirmar de qué aspecto del fenómeno se trata en tanto él no haya hecho los arreglos experimentales del caso; pero una vez que el dispositivo experimental está definido, la presencia del observador no es más necesaria para que el "interior" del fenómeno se manifieste.

Creemos que las reflexiones precedentes absuelven a Bohr de todo tipo de puro subjetivismo o de idealismo.

Si se admite que para Bohr existe una naturaleza exterior a nosotros más sin embargo independiente a nosotros, se puede decir entonces que para él esa naturaleza está estructurada según el patrón de la complementariedad, es decir que los diferentes aspectos de la naturaleza son en general aspectos complementarios. Es claro entonces en qué sentido, a nuestro juicio, debe entenderse la complementariedad como una solución a la paradoja cuántica y por qué no se trata de un mero acuerdo lingüístico.

Nuestra interpretación de la idea de realidad de Bohr difiere de la de algunos autores que sostienen que Bohr es finalmente un realista<sup>20</sup> y que esa realidad en sí estaría estructurada según el patrón de la complementariedad<sup>21</sup>.

#### PRESUPUESTOS FILOSOFICOS EN QUE SE BASAN LAS TESIS DE BOHR

Las tesis de Bohr, y por ende su idea implícita de realidad, se basan en dos suposiciones lingüísticas: la unicidad del lenguaje común y la prescripción de usar los conceptos sólo por medio de una experiencia concreta. Si se rechaza una cualquiera de esas dos suposiciones, no puede sostenerse que sea imposible de explicar la existencia de  $h$ , y tampoco puede decirse que no sea posible separar conceptualmente el instrumento de medida del objeto atómico.

Si se rechaza la idea de la unicidad del lenguaje corriente, se puede concebir una realidad física que existe independiente de nosotros y que es finalmente la explicación de las propiedades de los fenómenos cuánticos, y podemos tratar de encontrar un nuevo lenguaje para describir y explicar esa realidad.

Aún aceptando únicamente los conceptos del lenguaje corriente, es posible concebir una ontología rehusando el uso restrictivo de los conceptos preconizado por Bohr. Así, por ejemplo, en la teoría de De Broglie-Bohr<sup>22</sup> se conciben la partícula y la función de onda como entidades en sí, que existen independientes del observador. Si bien la teoría tiene sus propios problemas, y aún puede argumentarse que se trata de una inmunización no exitosa<sup>23</sup>, el hecho es que ella puede reproducir, sobre una base ontológica, todas las predicciones de la

mecánica cuántica, y las nociones introducidas, a pesar de lo nuevas, no son sin embargo más que un refinamiento de nociones que existen en el lenguaje clásico.

Otra posibilidad la constituye la modalidad de existencia propuesta por Shimony<sup>24</sup>, quien sigue la línea de algunas ideas de Heisenberg<sup>25</sup>. Shimony propone una modalidad de existencia que llama la *potencialidad*. Según su propuesta, ciertas propiedades de un objeto cuántico están *actualizadas* pero la mayoría tienen el status de *potencialidades*. Esta imagen de la realidad se enfrenta al problema de la *actualización* de las potencialidades, que en esencia es el mismo problema de la reducción de la función de onda. El punto importante es que los argumentos de Bohr no excluyen este tipo de ontología, la cual se basa en ideas que son un refinamiento de los conceptos del lenguaje corriente.

Los dos contraejemplos mencionados muestran que, aún sin salirse del lenguaje corriente, es posible tratar de hallar una ontología que explique las regularidades cuánticas o sea que, aún si uno acepta la tesis de la unicidad del lenguaje común, no se sigue necesariamente que haya que renunciar a una ontología.

El rechazo a la ontología de Bohr no tiene entonces un carácter de necesidad lógica. Es legítimo preguntarse si no existe una realidad trascendente a los fenómenos, la cual sería finalmente la explicación del acuerdo intersubjetivo y de la regularidad de los fenómenos. El deseo de hallar una ontología que pueda adaptarse a los hechos es un deseo natural del pensamiento y no es claro en las ideas de Bohr por qué tal deseo deba considerarse como desprovisto de sentido. Este deseo de ontología se hace aún más agudo si se acepta la interpretación que hemos presentado en la sección anterior, según la cual Bohr acepta la existencia de una realidad exterior a nosotros pero no independiente de nosotros, a la cual él llama la naturaleza. Uno se pregunta qué tipo de explicación se puede dar a la interdependencia entre esa naturaleza y nosotros mismos. En una concepción realista uno invoca la realidad en sí como razón de ser de esa interdependencia. Pero si se rechaza la búsqueda de una ontología ¿cómo explicar esa interdependencia?. ¿Son los observadores, ellos mismos un producto de la naturaleza, el origen de esa naturaleza? Y si la respuesta es positiva ¿por qué tipo de mecanismo?

## CONCLUSIONES

Del análisis que hemos hecho de las ideas de Bohr se puede concluir que Bohr no construyó un sistema coherente de pensamiento. Su intención era como el mismo expresa, estudiar:

“... la lección de epistemología que nos ha dado el desarrollo moderno de la física atómica<sup>26</sup>”.

Debemos entonces considerar sus tesis únicamente como una *lección de epistemología* constituida fundamentalmente por varias intuiciones que Bohr no justificó plenamente. Según nuestro estudio esas intuiciones son:

- a) La unicidad del lenguaje común.
- b) La indivisibilidad de los fenómenos atómicos .
- c) El modo complementario de descripción.
- d) La concepción de la ciencia como una epistemología sin ningún carácter ontológico.

Entre esas intuiciones quizás la más remarcable es la de la *indivisibilidad*. En efecto, los últimos datos de la física, tanto teóricos como experimentales, han confirmado el valor de esa intuición, en el sentido que aún desde un punto de vista realista debemos aceptar la existencia de una clase de *totalidad* de los fenómenos cuánticos, que va básicamente en la dirección vislumbrada por Bohr con sus ideas de la indivisibilidad. El modo complementario de descripción es también una notable intuición epistemológica de Bohr pues constituye realmente un marco conceptual adecuado para hablar de la experiencia cuántica de una manera exenta de ambigüedad.

Hemos indicado también que las tesis de Bohr sobre el lenguaje constituyen la piedra angular de su pensamiento. Sus ideas sobre el lenguaje están estrechamente ligadas con su intuición acerca del carácter puramente epistemológico de la ciencia, intuición que podemos reformular diciendo que la ciencia física está privada de la posibilidad de describir la realidad en sí. Esta última frase obviamente solo tiene sentido desde una perspectiva realista pues según el punto de vista de Bohr el empleo que acabamos de hacer de la palabra realidad es ambigüo.

Ahora bien, dado que no disponemos de una interpretación realista del formalismo cuántico que sea exenta de problemas conceptuales, ni de una teoría construida sobre una base realista, o sea fundada sobre la objetividad fuerte, que tenga todo el poder de predicción de la mecánica cuántica y que no pueda ser considerada, desde un punto de vista epistemológico, como una inmunización no exitosa, no podemos afirmar entonces que las tesis de Bohr acerca del lenguaje y en general acerca de la realidad física hayan sido refutadas.

Y si se tiene en cuenta la situación actual de la física cuántica podemos decir que las tentativas por construir una física cuántica sobre la base de la objetividad fuerte parecen bastante lejanas de su meta. Es muy significativo, a este respecto, constatar que la física de hoy en día, tal como se practica por la mayoría de los físicos, está orientada precisamente en la dirección indicada por Bohr. Y ello aún si los especialistas mismos no son totalmente conscientes de este hecho.

## Agradecimientos

Deseo expresar mis agradecimientos al profesor Bernal D'Espagnat por las valiosas discusiones que llevamos a cabo acerca de la interpretación de las ideas de Niels Bohr.

## REFERENCIAS

1. Roldán, J; Langage, Réalité et Mécanique Quantique, Thèse, Paris 1987.
2. Schrödinger, E; Naturwissenschaften 23p. 807-812; 823-828; 844-849 (1935), Traducción inglesa en Wheeler, J.A. y Zurek, W.H., Quantum Theory and Measurement (Princeton University Press, 1983) pág. 152-167.
3. Ver por ejemplo: Schrödinger, E; What is life & Mind and Matter (Cambridge University Press, 1967); Nature and the Greeks (Cambridge University Press, 1955) y My View of the World (Cambridge University Press, 1964).
4. Shimony, A; Réflexions sur la Philosophie de Bohr, Heisenberg et Schrödinger en Journal de Physique, Colloque C2, Supplément au No. 3, Tome 42, Mars 1981 page C2-81.
5. Schrödinger, E.; What is life & Mind and Matter p. 127 (Cambridge University Press, 1987 (Traducción de la cita por J.R.Ch.).
6. Ver por ejemplo sus tres colecciones de ensayos: Bohr, N; Atomic Theory and the Description of Nature (Cambridge University Press, 1934); Physique Atomique et Connaissance Humaine (Gauthier - Villars, 1957) y Essays 1958-1962 on Atomic Physics and Human Knowledge (Interscience Publishers, 1963).

7. Ver por ejemplo: Chevalley, C; Mécanique Quantique et Positivisme 1925-1939 (Mémoire), D'Espagnat, B; Une Incertaine Réalité, Chap. 1 (Gauthier-Villars, 1985) y la Ref (1).
8. Einstein A; *Philosopher - Scientist* (P.A. Schipp, Ed; Open Court, 1968).
9. Bohr, Phys. Rev. 48, 696-702 (1935).
10. Einstein, A; Podolsky, B; y Rosen, N; Phys. Rev. 47, 777-780 (1935).
11. Ref. (9). (Traducción de la cita y de las siguientes por J.R.Ch.).
12. Ref. (9).
13. Ref. (9).
14. Ref. (9).
15. Ver por ejemplo: Heitler, W; *The Quantum Theory of Radiation* (Dover Publications, Inc., New York, 1984).
16. Bohr, N; *Physique Atomique et Connaissance Humaine*, pág. 68 (Gauthier-Villars, 1987).
17. Ref. (16) pág. 119.
18. Ref. (16) pág. ix.
19. D'Espagnat, B; *Une Incertaine Réalité* (Gauthier-Villars, 1985).
20. Ver por ejemplo Folse, H; *The Philosophy of Niels Bohr*, (North-Holland, Amsterdam, 1985).
21. Ver por ejemplo Cohen, Tannoudji; 6, *Etre à la fois spectateur et acteur, L'Humanité*, Jeudi 6 Fervrier 1986.
22. De Broglie, L; *Comptes Rendus* 184, 273-274 (1927); *Journal de Physique et du Radium* 8, 225-241 (1927); Bohr, D. Phys. Rev. 85, 166-179 (1952); Phys. Rev. 85, 180-193 (1952).
23. D'Espagnat, B; Ref. (19).
24. Shimony, A; *Physical and Philosophical Issues in the Bohr-Einstein Debate*, Preprint.
25. Heisenberg, W; *Physics & Philosophy* (Harper & Row Publishers, New York, 1958).
26. Ref. (16) pág. vii.



**ACADEMIA COLOMBIANA DE CIENCIAS EXACTAS,  
FÍSICAS Y NATURALES**