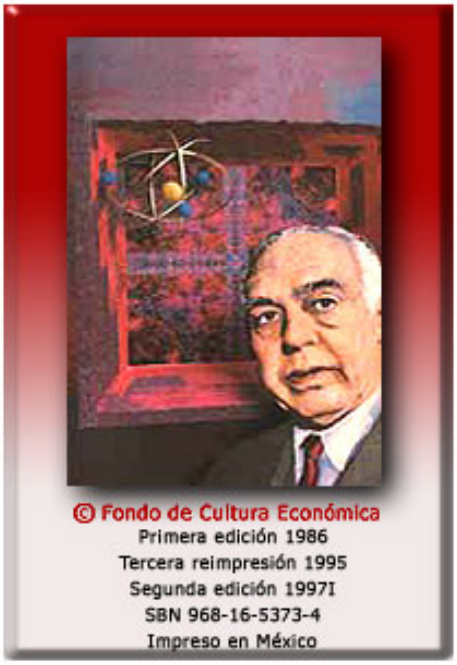
NIELS BOHR: CIENTÍFICO, FILÓSOFO, HUMANISTA

Autor: LEOPOLDO GARCÍA-COLÍN S. MARCOS MAZARI / MARCOS MOSHINSKY et al.

- COMITÉ DE SELECCIÓN
- EDICIONES
- PRÓLOGO
- PRIMERA PARTE: LA FÍSICA ENTRE 1900 Y 1913



Y LAS PARADOJAS QUE BOHR ENFRENTÓ

- II. NIELS BOHR: Contraria sunt complementa
- SEGUNDA PARTE: LA CONTRIBUCIÓN DE BOHR A LA FÍSICA ATÓMICA
- IV. NIELS BOHR, UN HOMBRE CON PRINCIPIOS
- V. EL PRINCIPIO DE CORRESPONDENCIA Y LA ESTRUCTURA DE LOS ÁTOMOS
- TERCERA PARTE: LA CONTRIBUCIÓN DE BOHR A LA FÍSICA NUCLEAR
- VII. BOHR EN LAS REACCIONES NUCLEARES
- VIII. NIELS BOHR Y LA FISIÓN NUCLEAR
- CUARTA PARTE BOHR Y LA FUNDAMENTACIÓN DE LA MECÁNICA CUÁNTICA
- DIÁLOGO ENTRE PIER A. MELLO, OCTAVIO OBREGÓN Y LEOPOLDO GARCÍA-COLÍN
- EPÍLOGO
- BIBLIOGRAFÍA
- COLOFÓN
- CONTRAPORTADA

COMITÉ DE SELECCIÓN

Dr. Antonio Alonso

Dr. Gerardo Cabañas

Dr. Juan Ramón de la Fuente

Dr. Jorge Flores Valdés

Dr. Leopoldo García-Colín Scherer

Dr. Tomás Garza

Dr. Gonzalo Halffter

Dr. Raúl Herrera

Dr. Jaime Martuscelli

Dr. Héctor Nava Jaimes

Dr. Manuel Peimbert

Dr. Juan José Rivaud

Dr. Julio Rubio Oca

Dr. José Sarukhán

Dr. Guillermo Soberón

Coordinadora:

María del Carmen Farías

Indice

Siguiente

la

ciencia\14

para todos

Primera edición (La Ciencia desde México), 1986

Tercera reimpresión, 1995

Segunda edición (La ciencia para Todos), 1997

Este libro, *Niels Bohr: científico, filosofo, humanista*, fue editado en colaboracion con el Colegio Nacional. Además de las personas mencionadas en la portada, participaron en él los doctores Jorge FloresValdés, Mariano Bauer, Octavio Novaro, Virgilio Beltrán, Eugenio Ley Koo, Arturo Menchaca Rocha, Pier A. Mello y Octavio Obregón.

La Ciencia para Todos es proyecto y propiedad del Fondo de Cultura Económica, al que pertenecen también sus derechos. Se publica con los auspicios de la Secretaría de Educación Pública y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

D.R. © 1986 FONDO DE CULTURA ECONÓMICA, SA. DE C.V.

D.R. © 1997 FONDO DE CULTURA ECONÓMICA

Carretera Picacho-Ajusco 227, 14200 México, D.F.

ISBN 968-16-5373-4

Impreso en México

PRÓLOGO

MARCOS MOSHINSKY

El 7 de octubre de 1885 nació en Copenhague, Dinamarca, Niels Bohr, un hombre cuyo destino sería contribuir en forma fundamental a una revolución en la física y, a partir de ella, a la vida de la humanidad entera. La palabra revolución ha sido frecuentemente monopolizada por movimientos políticos de diferentes tipos. Pero es quizás la revolución científica la característica esencial de nuestro siglo y la que más ha alterado la vida del hombre. Por ello quisiera en las siguientes líneas analizar brevemente la vida y la obra de Niels Bohr en ocasión de su centenario.

La familia de Niels Bohr contaba con una larga tradición cultural. Su padre fue profesor de fisiología en la Universidad de Copenhague, lo cual permitió a sus hijos desarrollarse en un refinado ambiente intelectual.

Su país, Dinamarca, ofreció, desde antes de su nacimiento hasta la invasión nazi de 1940, un ambiente de paz y tranquilidad que propiciaba el estudio y en donde se percibían las influencias de sus vecinos: Inglaterra y Alemania. En la ciencia esas influencias se complementaban: la primera ponía énfasis en el método experimental y la filosofía pragmática, mientras que la segunda recalcaba más los aspectos formales y teóricos.

La educación profesional de Niels y su hermano Harald (que fue después un distinguido matemático) se realizó en la Universidad de Copenhague, bajo la influencia de todas las corrientes científicas de Europa, en aquella época el centro intelectual del mundo. Niels Bohr se doctoró en 1911 con un trabajo sobre la teoría electrónica de los metales.

¿Cuál era el panorama de la física que encontró Niels Bohr al iniciar su vida como investigador? La hipótesis de la constitución atómica de la materia data desde los tiempos de Demócrito, pero el paso de una concepción filosófica a la materialización científica ocurrió a principio del siglo XIX, con el uso de tal concepto en la química por Dalton. Con todo, a lo largo del siglo XIX la idea de que hubiera átomos asociados a diferentes elementos continuó siendo debatible, aunque a finales de dicho siglo, con el descubrimiento del electrón por J.J. Thompson, se empezó a ver que dichos átomos ya no eran los constituyentes últimos de la materia, sino que estaban a su vez formados por electrones y algún tipo de carga positiva que los compensara para garantizar la neutralidad eléctrica del átomo. Un brillante experimento de Rutherford en 1911 mostró que esa carga positiva debería de estar concentrada en un núcleo atómico cuya dimensión era de aproximadamente un cienmilésimo de la del átomo mismo, dando lugar a la concepción planetaria del átomo como núcleo rodeado de electrones.

Bohr se daba cuenta de la importancia de los descubrimientos realizados en Inglaterra y por ello decidió continuar sus estudios e investigaciones posdoctorales en ese país, primero en Cambridge con J.J. Thompson en 1911 pero luego con Rutherford en Manchester en 1932. Fue con este último: con quien inició una colaboración que duró toda su vida y que resultó inmensamente fructífera para la ciencia.

Consideró Bohr que el modelo de Rutherford para el átomo, aunque al parecer corroborado por los experimentos, no era estable desde el punto de vista de las leyes de la mecánica y la electrodinámica que se aceptaban en esa época. La teoría predecía que esos átomos debían sufrir un colapso en pequeñísimas fracciones de segundo, lo cual era patentemente absurdo. Para evitar ese colapso, Bohr recurrió a las ideas de cuantización que originalmente habían introducido Planck y Einstein en relación con la radiación y que él aplicó al movimiento de los electrones. Esas ideas impedían el colapso del átomo y además predecían, en una forma muy sencilla, el tipo de radiación que los átomos debían emitir y, en particular, el átomo de hidrógeno, predicciones ampliamente corroboradas por el experimento.

Bohr introdujo, pues, la primera formulación teórica que permitía entender la estabilidad de los átomos y

más adelante mostrar que las propiedades químicas de los elementos, sistematizadas en la tabla periódica de Mendeleiev, estaba directamente ligada al número y la ordenación de los electrones en el átomo correspondiente.

Los descubrimientos anteriores por sí solos hubieran justificado el papel prominente de Bohr en la física, y de hecho fueron la base para que se le otorgara el premio Nobel en 1922, pero sólo marcaron el inicio de su brillante carrera científica. Bohr se daba cuenta que su explicación de la estabilidad del átomo se basaba en agregar a la mecánica y electrodinámica clásicas el "pegoste" de la cuantización, y que lo que se requería era una nueva mecánica en donde este "pegoste" formara parte de los axiomas fundamenta]es. Durante la década de los veintes pasaron por la puerta del Instituto de Física Teórica (que la Universidad de Copenhague creó para albergar a Bohr y sus colaboradores) los más brillantes físicos del mundo, la mayoría de ellos muy jóvenes, que bajo el estímulo de múltiples discusiones con Bohr elaboraron las bases de lo que hoy se conoce como la mecánica cuántica. No en balde la interpretación más aceptada de esta mecánica se conoce con el muy preciso nombre de la interpretación de Copenhague.

Tuvo pues Bohr un papel fundamental en la elaboración de las teorías requeridas para la comprensión de la estructura de la materia, base de la mayor parte de los adelantos tecnológicos que hemos visto surgir en electrónica y ramas conexas en la segunda mitad del siglo XX.

No se limitó Bohr sólo al estudio de la estructura del átomo normada por los electrones que rodean el núcleo. Desde el inicio de su contacto con Rutherford en 1912 se interesó también en el núcleo mismo y, después del descubrimiento del neutrón en 1932, en la estructura de este núcleo como un agregado de protones y neutrones. En 1936 Bohr propuso un modelo para los núcleos atómicos, conocido como modelo colectivo o de la gota de líquido, que resultó fundamental para comprender muchas de las propiedades de la estructura y de las reacciones nucleares. En particular el modelo sirvió para analizar el proceso de fisión del núcleo de uranio descubierto en 1939 por Hahn y Strassman y fue Bohr el que identificó al isótopo 235 del uranio como el que se fusionaba con neutrones lentos. Contribuyó pues, en forma básica, al inicio de lo que debería llamarse Era Nuclear, aunque se conoce más frecuentemente como Era Atómica.

La invasión nazi de Dinamarca en 1940 sorprendió a Bohr en su país y tuvo que soportarla hasta 1943. Informado en ese último año que la Gestapo pensaba apresarlo, escapó a Suecia y de allí a Inglaterra en un avión del servicio de inteligencia británico. Allí se enteró de los esfuerzos que se estaban desarrollando para liberar la energía nuclear y, desgraciadamente, crear armas nucleares, con base en los descubrimientos a los que él había contribuido en los años treinta. Durante los últimos años de la segunda Guerra Mundial, tanto en Inglaterra como en Estados Unidos, Bohr realizó enormes esfuerzos para tratar que al terminar el conflicto no se produjera una carrera armamentista nuclear. Sugirió una y otra vez que el conocimiento alcanzado en Estados Unidos y en Inglaterra se hiciera público como muestra de su deseo de cooperación internacional. Predijo que si tal cosa no ocurría, de todos modos otros países podrían recrear los pasos seguidos pero en un ambiente de competencia y conflicto en lugar de cooperación, como efectivamente sucedió. La ceguera de los políticos con respecto al problema puede medirse por el comentario de Churchill quien, después de una entrevista con Bohr, se preguntó molesto porqué sabía tanto ese hombre de un proyecto ultrasecreto. No se daba cuenta que Bohr no necesitaba oír de las ideas de los demás sobre el tema, ya que muchas de las más importantes habían surgido por primera vez en su propia mente.

En los últimos años de su vida Bohr, además de su lucha constante por la paz y la cooperación internacional, fue un extraordinario promotor científico. Su Instituto de Física Teórica, que hoy en día lleva su nombre, continuó siendo lugar de entrenamiento para físicos provenientes de todas las partes del mundo. Fue uno de los principales impulsores para la creación del Centro Europeo de Investigaciones Nucleares (CERN) en Ginebra y alojó en su Instituto la sección teórica del CERN hasta que ésta pudo trasladarse a sus instalaciones permanentes. En Dinamarca promovió la creación de instalaciones nucleares y de desarrollo científico que, con sus aportaciones, contribuyeron a que fuera considerado el ciudadano más eminente de su país.

No cabe duda que Niels Bohr ha dejado una marca indeleble en el saber científico y en el tortuoso camino que la humanidad sigue en la búsqueda de un mundo mejor. Quisiera concluir con la cita siguiente: "Lo que es tan maravillosamente atractivo de Bohr como científico es su rara mezcla de audacia y precaución. Pocas veces ha habido un investigador que tuviera una intuición tan profunda de los problemas ocultos combinada con un sentido crítico tan desarrollado. Su conocimiento de cada detalle no lo distrae del principio básico subyacente. Es sin lugar a duda uno de los más grandes descubridores científicos de nuestra época." Las palabras son de Albert Einstein.

Indice

Siguiente

PRIMERA PARTE: LA FÍSICA ENTRE 1900 Y 1913 Y LAS PARADOJAS QUE BOHR ENFRENTÓ

I. NIELS BOHR:

PUENTE ENTRE LA FÍSICA

CLÁSICA Y LA MODERNA

JORGE FLORES

NIELS BOHR y Albert Einstein son los dos únicos grandes físicos del siglo XX que trascendieron "los treinta años maravillosos que sacudieron al mundo", como los llama George Gamow. Empiezan sus trabajos todavía bajo la égida de la ciencia decimonónica; inician, cada uno por su lado, una revolución en la física que culmina al finalizar los veintes, y sobreviven la época de la Gran Depresión para continuar en la frontera de la ciencia, ya convertida en una gran empresa profesional, hasta su muerte. Niels Bohr, cuyo centenario celebramos hoy, muere en 1962, y Einstein siete años antes.

Para entender el ambiente en que estos dos grandes sabios empezaron a trabajar y los problemas que enfrentaron, es necesario ver la ciencia, y la física en particular, con la perspectiva que se tenía en la primera década de nuestro siglo. Pero este periodo l900-1913 —que abarca las primicias cuánticas de Max Planck, la teoría de la relatividad y la del efecto fotoeléctrico de Einstein, y la audaz concepción atómica de Bohr, por el lado teórico, y los descubrimientos experimentales de J.J. Thomson y Ernest Rutherford, que afianzan el modelo planetario clásico del átomo— no puede concebirse aislado de la ciencia del siglo anterior. En efecto, el siglo XIX es el centro de un periodo histórico marcado en sus inicios por la Revolución Francesa y cuyo fin coincide con la primera Guerra Mundial.

Analicemos, pues, en forma breve la historia de la ciencia en el siglo pasado. Así apreciaremos mejor los problemas que Bohr enfrentó. Empecemos por la matemática, que se sacude en este periodo de transición entre el enciclopedismo del siglo XVIII y la gran especialización de nuestra época. Los matemáticos comienzan a preocuparse por el rigor, la lógica y la abstracción, y la geometría florece de manera audaz; se crea, por otro lado, lo que hoy llamamos física-matemática. Dos tendencias opuestas, una orientada hacia lo más abstracto, otra que apunta a la explicación de fenómenos físicos concretos, que se nutren mutuamente para el progreso matemático.

En el siglo XIX las publicaciones y los estudios sobre matemáticas crecen en forma exponencial en toda Europa. A principios del siglo la materia se encuentra dominada por los franceses y sus grandes escuelas de París, pero luego la imponente personalidad de Gauss ayuda a que las matemáticas alemanas se conviertan en el punto focal. Se renueva el álgebra, con la teoría de grupos, los determinantes y las matrices, y la teoría rigurosa de los números complejos. Asimismo, bajo la influencia de Riemman y de Gauss se expande el uso del análisis vectorial, tan útil en la física matemática y en la geometría diferencial. Comienza también el cálculo tensorial. Finalmente, en Inglaterra Boole y otros hacen los primeros trabajos en la lógica matemática.

Se renueva también la geometría, con la creación de la geometría proyectiva y, sobre todo, de las geometrías no-euclidianas. Gauss, y otros dos geómetras prácticamente desconocidos, el ruso Lobachevski y el húngaro Bolyai, engendran la geometría hiperbólica; por su parte, Riemman introduce espacios muy generales y sugiere el segundo tipo de geometría no-euclidiana, la elíptica. Finalmente, este mismo gran matemático alemán, funda la topología, concebida como el estudio de las propiedades invariantes bajo el efecto de transformaciones continuas. Otras tres ramas de las matemáticas, el análisis, la teoría de números y la probabilidad, avanzan también de manera considerable durante el siglo pasado.

Veamos ahora lo concerniente a la mecánica, ciencia que a veces suponemos parte de la matemática, y a veces la esencia de la física. Aunque en 1832 se logra entender el papel que desempeña el marco de referencia en la descripción mecánica, los desarrollos en esta ciencia no podrían considerarse del mismo nivel renovador que en geometría o en otras ramas de la física: Newton, sus leyes y su idea del tiempo absoluto permanecieron incólumes a lo largo de todo el siglo XIX. Más interesante resulta, desde el punto de vista que aquí nos guía, la influencia de la mecánica sobre otra rama de la ciencia: la termodinámica.

A mediados del XIX la mecánica suministra temas fundamentales al estudio de los fenómenos térmicos. Ya, gracias a Helmholtz, queda establecida la primera ley de la termodinámica; en 1850 Clausius y Thomson aclaran el problema de la degradación de la energía: la energía mecánica se puede utilizar íntegramente, pero la calórica no. En un sistema aislado, la energía se conserva, pero se degrada. He aquí la esencia de la segunda ley de la termodinámica. La mecánica influye también en otro aspecto: se inventa la teoría cinética de los gases, con la cual se busca entender mecánicamente el fenómeno termodinámico. Hace así su entrada al mundo de la física el cálculo de probabilidades.

En forma paralela hay un gran progreso en la óptica instrumental. En la perspectiva de la historia que hoy nos interesa relatar, es importante resaltar la invención de un aparato que habría de ocupar un lugar de gran prominencia: el espectroscopio de Kirchhoff y Bunsen. Su primer espectroscopio consistía en un prisma, una cajetilla de cigarros a la cual se le había recortado en su base una rendija, el extremo de dos viejos telescopios y, como fuente de luz, uno de esos mecheros usados por Bunsen. La muestra a estudiar se colocaba en el mechero y se le calentaba hasta la incandescencia. La luz emitida, refractada en el prisma, pasaba luego por la rendija. Los diferentes colores se refractaban en el prisma de manera diversa. Al mover los telescopios, la imagen de la rendija se veía de diferente color. Así descubrió Kirchhoff que cada elemento químico —cuya existencia, para ese entonces, comenzaba a establecerse firmemente gracias a los esfuerzos de Lavoisier, Proust, Dalton y muchos otros químicos— produce al ser calentado un conjunto de líneas de colores que le es característico. Así, por ejemplo, el vapor de sodio incandescente emite una doble línea amarilla y el hidrógeno marca su presencia por una serie de líneas, la llamada serie de Balmer, cuyo espaciamiento disminuye a medida que su color se acerca más al azul. Estos resultados experimentales resultaban tan misteriosos para la ciencia del siglo XIX, que a ese conjunto de líneas de colores se le llamó el espectro de un elemento.

Grande fue el progreso en la electricidad y el magnetismo, que culmina con la gran síntesis electromagnética de Maxwell. Los trabajos de Ampere y de Faraday abren el camino a una teoría en que el magnetismo y la electricidad van de la mano. Campos eléctricos variables producen un campo magnético y viceversa. Unos alimentan a los otros, por lo que pueden propagarse sin necesidad de sustentarse en cargas o en imanes. Estos campos que se propagan pueden constituir la luz, que así estaría formada por ondas electromagnéticas.

En 1888 el profesor alemán Rudolf Hertz hizo saltar chispas a voluntad en un pequeño aro de alambre con un intersticio al colocarlo en la vecindad de un circuito oscilante, en el cual también podía producir chispas. La corriente variable en el circuito oscilante daba origen a campos eléctricos y magnéticos que se propagaban y eran detectados luego en el aro: así fueron descubiertas las ondas hertzianas, que no eran otras que las ondas electromagnéticas predichas antes por Maxwell. Estas ondas hertzianas se reflejan, refractan, pueden polarizarse y sufrir interferencia igual que la luz. "Es difícil no inferir que la luz consista en oscilaciones transversas del mismo medio que es la causa de los fenómenos eléctricos y magnéticos", nos dice Maxwell. Para él y otros físicos del siglo XIX, este medio es el éter.

Cuando Hertz hacía saltar chispas en su aro, en realidad forzaba grandes aceleraciones sobre algunas cargas eléctricas. De acuerdo a la teoría electromagnética clásica, ello genera pulsos que viajan con la velocidad de la luz. En otras palabras, una carga eléctrica acelerada genera una onda electromagnética. En particular, si la carga da vueltas alrededor de un centro fijo con una cierta frecuencia, las ondas que emite tienen esa misma frecuencia. En tal caso, la carga consume al radiar energía electromagnética parte de su energía mecánica.

Por aquellos días, Kirchhoff descubrió la ley que hoy lleva su nombre según la cual un gas absorbe luz de la misma longitud de onda que emite al estar incandescente. Además de jugar con su espectroscopio, Kirchhoff planteó también otro problema: el llamado cuerpo negro, que es el absorbedor de luz más perfecto, cuyo comportamiento habría de constituir un gran enigma para los físicos del siglo XIX. La teoría clásica de la luz, basada en las leyes de Maxwell, unida a las leyes de la termodinámica, no es capaz de explicar la radiación del cuerpo negro. Tendría que venir un alumno de Kirchhoff, Max Planck, para explicarnos los misterios del cuerpo negro y establecer así las primicias de la teoría cuántica.

Como ya dijimos, un cuerpo negro absorbe todas las ondas que inciden sobre él, sin importar la frecuencia de la radiación. Aunque el cuerpo negro perfecto no existe, se puede construir uno que casi lo sea mediante el simple truco de hacer un agujero pequeño en una caja cerrada con sus paredes interiores pintadas de negro; la luz que penetra por el agujerito tendría una probabilidad pequeñísima, casi despreciable, de volver a salir por la apertura: de hecho ha sido absorbida y el sistema se comporta como si fuera negro. Si ahora forzáramos el proceso inverso, calentando la caja hasta la incandescencia, del agujero saldría luz con todas las longitudes de onda. Si el radiador negro emitiera en todas las frecuencias por igual, casi toda la energía se iría en radiar en la zona de más alta frecuencia. Ya que la luz de mayor frecuencia en el espectro visible es la violeta, esta conclusión de la física clásica se llegó a conocer tomo la "catástrofe ultravioleta". La tal catástrofe nunca fue observada en el experimento, y se constituyó así en la catástrofe de la física clásica.

Vemos, pues, que con sus investigaciones sobre los espectros atómicos y su planteamiento del problema del cuerpo negro, Kirchhoff preparó el entierro de la física clásica, la basada en las leyes de Newton y Maxwell, y abrió la puerta a una nueva física, la física cuántica, vigente hasta nuestros días.

Si a los espectros de Kirchhoff y a la catástrofe ultravioleta añadimos lo que Michelson y Morley encontraron, así como lo que se sabía del efecto fotoeléctrico tenemos ya una cuarteta infernal de experimentos contra la física clásica. Veamos como ocurrió esto.

La teoría cuántica avanzó a saltos bien definidos y en treinta años se convirtió en la firme base de la física moderna. Con su ayuda podemos contestar preguntas tan variadas como ¿por qué hay algunos materiales que son conductores y otros que son aislantes?, o ¿podría haber en la Tierra una montaña muchísimo más alta que el monte Everest?, así como otras muchas que nos explican el comportamiento de la materia en bulto; también podemos atacar cuestiones más fundamentales, que van desde las reacciones químicas hasta aquéllas que tienen lugar en el Sol y lo proveen de energía, o a entender la constitución del núcleo de los átomos, o incluso a formular una imagen de los entes más fundamentales, las así llamadas partículas elementales.

Los saltos cruciales para establecer la física cuántica se debieron al trabajo de un puñado de científicos. Max Planck, en la Navidad de 1900, propuso la existencia del *cuanto* para resolver la catástrofe ultravioleta; vino luego Einstein, quien en 1905 (el mismo año en que postuló el principio de relatividad y entendió el movimiento browniano) explicó el efecto fotoeléctrico, para lo cual requirió que la luz esté formada por corpúsculos, que se llaman fotones; Niels Bohr, físico danés cuyo centenario celebramos este 7 de octubre de 1985, aplicó en 1913 las ideas cuánticas para entender el espectro del átomo de hidrógeno, en particular la serie de Balmer; el físico y noble francés Louis de Broglie propuso en 1923 que a toda partícula debe asociarse una onda, cuya longitud de onda es inversamente proporcional a su velocidad; finalmente, en 1924, Schrödinger, austriaco, desarrolló la mecánica ondulatoria y estableció su ecuación, y Werner Heisenberg, alemán, creó la llamada mecánica de matrices y postuló el fundamental Principio de Incertidumbre. Con la interpretación probabilística de la mecánica cuántica, sugerida por Max Born, la formulación del Principio de Exclusión por Wolfgang Pauli en 1925, y los intentos de Dirac para unir la nueva mecánica con la teoría especial de la relatividad, la concepción cuántica de la naturaleza quedaría esencialmente completa y lista para ser aplicada a una casi inimaginable variedad de fenómenos. Veamos ahora en detalle la historia de los primeros saltos cuánticos.

La mecánica estadística puede aplicarse también a las ondas en el interior de una cavidad, como aquella

que imaginó Kirchhoff al tratar la radiación del cuerpo negro. Éste es un sistema termodinámico, susceptible de análisis con las técnicas estadísticas. La conclusión de este análisis fue ¡la existencia del cuanto!

Herman Helmholtz (1821-1894), Rudolf Clausius (1822-1888) y Gustav Kirchhoff (1824-1887) tuvieron muchas cosas en común. Además de ser físicos alemanes contemporáneos y de haber hecho contribuciones fundamentales a la termodinámica —a Helmholtz debemos la primera ley, a Clausius la segunda y de las hazañas de Kirchhoff ya hemos hablado—, los tres fueron profesores en la Universidad de Berlín y ahí dejaron una gran tradición, que habrían de heredar dos de sus alumnos, Wien y Planck.

El primero de ellos, Wien, obtuvo su doctorado con Helmholtz y poco después empezó a trabajar en el problema de la radiación del cuerpo negro. Observándola encontró que las longitudes de onda de la radiación electromagnética emitida se distribuyen de una manera que no es uniforme, sin que su intensidad presente un pico en un valor intermedio. La longitud de onda en el pico de la curva varía inversamente con la temperatura, de tal forma que a medida que ésta aumenta el color predominante se corre hacia el azul. A esta propiedad se le llama la ley del desplazamiento de Wien, quien pudo deducirla con puro razonamiento termodinámico. Para ello supuso que en la cavidad del cuerpo negro existe un conjunto de ondas electromagnéticas que ejercen presión sobre las paredes de esta cavidad. Con este mismo modelo lord Rayleigh pudo explicar la forma de la curva para frecuencias pequeñas; Wien mismo lo hizo cuando esas frecuencias son grandes, aunque ninguno de los dos pudo obtener de la mecánica estadística la forma completa de la curva. El cálculo de Rayleigh, correcto según los cánones de la física clásica, predecía una intensidad que siempre crecía con la frecuencia, de hecho igual al cuadrado de ésta. En consecuencia, la energía total radiada es infinita y nos hallamos frente a una verdadera catástrofe ultravioleta.

Pronto Planck sigue la tradición establecida en Berlín por sus ilustres maestros y ataca problemas termodinámicos. Retoma el mismo modelo que lord Rayleigh y elige un simple oscilador armónico cargado (es decir, una carga que oscila sujeta a un resorte) para simular la emisión de luz. Con ello obtiene de inmediato que la intensidad emitida a una cierta frecuencia se determina por dos factores: el primero, proporcional al cuadrado de la frecuencia, y el segundo, a la energía promedio contenida en el oscilador. El primer factor es equivalente a la ley de Rayleigh; el segundo, la energía promedio, es proporcional a la temperatura absoluta de la cavidad y la constante de proporcionalidad, es, de acuerdo con un teorema general que Boltzmann probó en la mecánica estadística clásica, una constante universal k, que hoy llamamos la constante de Boltzmann. Con ello Planck obtiene un resultado acorde con la ley de Wien y con la catástrofe ultravioleta. Estas conclusiones de la mecánica y el electromagnetismo clásicos son inevitables.

Para eliminar esa catástrofe, Planck se vio forzado a una medida extrema y audaz. Al calcular la energía promedio en cada oscilador, abandonó las recetas de Boltzmann y postuló que las energías del oscilador sólo vienen en paquetes, que él denominó cuantos. La energía sólo puede ser múltiplo de una energía fundamental, $\mathbf{E_0}$, que es la de un paquete. Con esta suposición tan revolucionaria, Planck pudo explicar los resultados del cuerpo negro eliminando así la catástrofe ultravioleta. Al mismo tiempo, cerró el capítulo clásico de la física y abrió el que dominaría esta ciencia durante el siglo XX: el capítulo de la física cuántica.

Para que su cálculo fuera consistente con la ley de Wien —que es un resultado de la termodinámica, y por ello independiente de los detalles del modelo empleado—, Max Planck tuvo que suponer que la energía $\mathbf{E_0}$ es proporcional a la frecuencia $\boldsymbol{v}$:

$$\mathbf{E_0 = h}\boldsymbol{v}$$

Así entra en la física la constante h, hoy llamada constante de Planck, que es ubicua en la física moderna. El valor de h, cuando usamos el sistema de unidades centímetro-gramo-segundo (que es apropiado al tratar con los sistemas físicos que hallamos cotidianamente) es pequeñísimo: $\mathbf{h=6.62 \times 10^{-27}}$ erg. seg. Por ello, en el estudio de muchos fenómenos con objetos a la escala del hombre o mayores, aparenta ser cero. En tal

caso, la energía ya no viene en cuantos, sino que parece ser continua, como en la mecánica de Newton. Recuperamos así, como un caso límite en que la constante de Planck es cero, la física clásica. De manera análoga a corno la mecánica newtoniana se obtenía de la física relativista cuando la velocidad de la luz se considera infinita, la física clásica es un caso limítrofe de la cuántica si h puede despreciarse. En la vida diaria, cuando los cuerpos se mueven a velocidades muy pequeñas respecto a la luz y tienen masas muy grandes, los efectos relativistas y cuánticos no pueden observarse. Las leyes de Newton, como un caso limítrofe, recuperan su valor y son útiles para describir el movimiento de proyectiles, ciclones y planetas. Pero en el mundo de lo muy pequeño, h es siempre diferente de cero y su presencia se hace sentir en múltiples fenómenos.

Uno de estos fenómenos es el efecto fotoeléctrico. Supongamos que se ilumina con luz ultravioleta la superficie de un metal alcalino; se observa que esta superficie adquiere carga positiva, porque ha dejado escapar electrones. Podemos luego medir la velocidad y el número de esos electrones; se observa que el número aumenta con la intensidad de la luz pero que su velocidad sólo depende de la frecuencia de ésta. En particular, si la frecuencia se hace muy pequeña la luz incidente no es capaz de producir la corriente fotoeléctrica, es decir, no puede arrancar electrones al metal por más intensa que la luz sea.

En uno más de los artículos fundamentales que Einstein publicó en 1905 (año en que, por cierto, también obtuvo su doctorado), se generaliza la idea de los cuantos de luz para explicar estos experimentos sobre fotoelectricidad. Einstein, a diferencia de Planck, no sólo postuló las características cuánticas de la luz durante los procesos de emisión y absorción, sino que supuso que la luz está formada por cuantos de energía igual al producto de h por la frecuencia, que vuelan a la velocidad de la luz. A estos cuantos se les llamaría fotones, las partículas de luz. Con esta hipótesis cuántica, la explicación del efecto fotoeléctrico es fácil: un fotón choca con un electrón y lo expulsa del metal si la energía que le da es mayor que la llamada función de trabajo; mientras mas fotones haya, mas electrones pueden ser extraídos del metal, pero la energía de estas partículas solo depende de la que originalmente tenga el fotón y no el numero de estos. La corriente fotoeléctrica depende, por consiguiente de la intensidad de la luz, pero la energía de los electrones solo de la frecuencia de la radiación incidente. Con su audaz concepción corpuscular de la luz, Einstein golpea brutalmente, por segunda vez, a la física clásica.

El siguiente salto en la historia de los cuantos lo dio Niels Bohr en 1913 al postular la idea del salto cuántico para explicar por qué los espectros atómicos existen. La historia del modelo atómico de Bohr es como sigue.

J.J. Thompson y su discípulo Ernest Rutherford descubrieron, respectivamente, el electrón y el núcleo de los átomos. Con estos ingredientes, se propuso un modelo planetario y clásico para el átomo, que sería el de un pequeño sistema solar, con el núcleo en el papel del Sol y una nube de electrones circundándolo, como si fueran los planetas. Tal modelo conduce, por lo menos, a dos consecuencias desagradables.

La primera de esas consecuencias es verdaderamente catastrófica: el modelo planetario y la física clásica predicen que los átomos son inestables. En efecto, como ya mencionamos, un electrón cargado que da vueltas alrededor del núcleo emite ondas electromagnéticas, cuya frecuencia es la del movimiento del electrón al recorrer su órbita y cuya energía proviene de la energía mecánica de la partícula. El electrón pierde, pues, su energía en forma continua y cae irremisiblemente al núcleo. La teoría electromagnética de Maxwell predice que, en un tiempo pequeñísimo, la nube electrónica —y con ella el átomo— habría desaparecido. La materia, de acuerdo a la física clásica, sería inestable.

La segunda consecuencia del modelo planetario clásico es igualmente desagradable y, como la primera, también inevitable si aceptamos las leyes de Newton y de Maxwell. Cuando el electrón radía y pierde su energía mecánica cada vez se mueve más despacio, recorriendo su órbita con una frecuencia que disminuye continuamente. Por ello emitiría, según la teoría clásica, radiación electromagnética de todas las frecuencias y no luz con un espectro discreto. Los espectros de Kirchhoff y la serie de Balmer constituyen un enigma que la física clásica no puede resolver.

Al terminar sus estudios de doctorado en Copenhague, Bohr decide estudiar en Inglaterra, en el Cavendish, bajo la dirección de J.J. Thomson. Muy pronto, Bohr propone que la mecánica clásica no funciona dentro del átomo, sino que éste sólo puede existir en un conjunto discreto de estados estacionarios con energías $\mathbf{E_1}$, $\mathbf{E_2}$, ... y cuyo momento angular está cuantizado; cuando un electrón se encuentra en uno de ellos, no puede emitir ni absorber radiación; estos procesos se dan cuando el átomo pasa de uno de esos estados estacionarios a otros y la frecuencia de la luz necesaria obedece la ecuación

$$\mathbf{E}n - \mathbf{E}m = \mathbf{h}\nu nm$$

es decir, sólo radía aquellos cuantos cuya frecuencia es tal que se conserva la energía.

Los grandes físicos de la vieja generación —nuestro conocido ya Rayleigh y el mismo maestro de Bohr, J.J. Thomson— se opusieron al nuevo modelo del joven danés. Por esta razón entre otras, Bohr deja el Cavendish y va a trabajar con Rutherford en Manchester, donde en 1913 completa el nuevo esquema atómico, acorde con las ideas cuánticas de Planck y Einstein, pero violentamente opuesto a la mecánica de Newton.

Con su modelo, Bohr pudo explicar la serie de Balmer y aun predecir lo que ocurriría al bombardear átomos con electrones de baja energía: si ésta fuera menor que la diferencia $\mathbf{E_1 - E_0}$, es decir, la mínima energía requerida para excitar el átomo, el electrón no podría comunicar a éste excitación alguna. Esta concepción, ajena por completo a las ideas clásicas cuando se aplican al choque entre partículas, fue comprobada por los científicos alemanes James Franck y Gustav Hertz (este último sobrino de Rudolf Hertz), quienes, alrededor de 1920, bombardearon gases y vapores con electrones de diferentes energías. Cuando la energía no es suficiente para que un cuanto completo se absorba, el electrón rebota elásticamente y no se emite luz, El modelo atómico de Bohr, aunque no es muy satisfactorio desde el punto de vista teórico, recibió así un fuerte impulso.

Para valorar realmente el trabajo de Bohr, habrá que darnos cuenta que antes de él, en los trabajos de Planck y de Einstein, así como en la explicación que Debye dio de los calores específicos de los sólidos, el cuanto siempre se había asociado con energía. La cuantización del momento angular era una cosa del todo nueva. De hecho Bohr predijo el valor de la constante de Rydberg, que fija la escala atómica en energías y el tamaño del átomo, en términos de constantes como la de Planck y la carga del electrón, que ya eran conocidas, sin ningún parámetro ajustable. Este es un logro casi sin paralelo en la historia de la ciencia.

Bohr pudo explicar con su teoría muchas cosas, con un éxito luego del otro. En cierto sentido, predijo la serie de Lyman en el ultravioleta, entendió el espectro del helio ionizado y explicó por qué la constante de Rydberg debería aparecer en otros espectros atómicos. Sin embargo, falló al atacar el efecto Zeeman en general, pues por ese entonces el espín del electrón no había sido descubierto. Finalmente, halló obstáculos para entender la estructura detallada de átomos complejos, pues en aquel tiempo no había, prácticamente, una mecánica cuántica, y en particular no se sabía del principio de exclusión de Pauli. Sin embargo, se vislumbró que el espectro visible tendría su análogo en el de los rayos X de elementos más pesados, con lo cual conceptos como el de número atómico quedarían por fin establecidos. Esto último se debió a los experimentos de Moseley en Inglaterra.

En todo caso, el trabajo de Bohr y su explicación del espectro del hidrógeno quedan ahí como uno de los grandes triunfos de la física. La aparición de una nueva mecánica, la mecánica cuántica, estaba ya preparada.

II. NIELS BOHR: Contraria sunt complementa

MARIANO BAUER

EL ACOTAMIENTO dado al título de esta Primera Parte no queda bien claro para este expositor. ¿Se debe hablar de toda la física en ese lapso o sólo de lo que interesaba a Bohr, esto es, lo que constituía el objeto de su atención? Al hablar del entorno intelectual, físico e histórico en que se desenvuelve un individuo, puede verse que la mayor parte de lo que acontece a su alrededor le es irrelevante o inconsecuente. Cada persona establece su propio "cono de luz" en cuanto a los "eventos" que realmente influyen en sus acciones o en su manera de pensar. No seria remoto —creo yo— que la afición de Bohr por el cine, en particular las películas de vaqueros, tuviera más que ver en la estructuración del principio de complementariedad que muchos de los artículos científicos que pasaron por sus manos. Parece entonces más apropiado considerar primero cuáles han sido las contribuciones esenciales de Bohr al desarrollo de la física. Y de ahí establecer cuáles remontan sus orígenes al periodo señalado, dilucidando las conexiones.

La fecha de 1918 corresponde a la publicación de su artículo "Sobre la constitución de los átomos y las moléculas" que constituye el primer enunciado del llamado "átomo de Bohr". Él mismo advierte: "Debe aclararse que esta teoría no pretende explicar fenómenos en el sentido en que la palabra 'explicación' ha sido usada anteriormente en la física. Lo que se pretende es conjuntar varios fenómenos que aparentan no tener conexión y mostrar que sí están conectados." El distinguido físico Otto Stern (del experimento Stern-Gerlach) confesó alguna vez haber dicho entonces: "Si esas vaciladas de Bohr resultan ser ciertas, me retiro de la física."

A esa presentación modesta y a esta reacción visceral puede contrastarse lo que opinó Einstein años más tarde (1951), al recordar las graves contradicciones que se planteaban entre la mecánica y la electrodinámica clásicas, y lo que se apreciaba en las observaciones de la absorción y emisión de radiación electromagnética por la materia:

> Todos mis intentos de adaptar los fundamentos teóricos de la física a este nuevo tipo de conocimiento fracasaron completamente, Era como si nos estuvieran moviendo el piso, sin que se pudiera encontrar algo de tierra firme sobre la cual construir. Que estos cimientos inseguros y contradictorios le fueran suficientes, aun a alguien de la sensibilidad e instinto únicos de Bohr para descubrir las principales leyes de las líneas espectrales... me pareció un milagro —y todavía hoy me lo sigue pareciendo—. He aquí la forma máxima de musicalidad en la esfera del pensamiento.

En lo anterior está señalado ya el ámbito de "las paradojas que Bohr enfrentó", esto es, los fenómenos radiactivos. Pero la explicación, ya en el sentido usual, de estas paradojas y otras más que fueron surgiendo es a lo que se aboca Bohr después de los enunciados iniciales de su trabajo de 1915. Es en este proyecto de "explicación" donde surgen, entre muchos trabajos específicos, lo que hoy conocemos como "el principio de correspondencia" y "el principio de complementariedad" de Bohr, naturalmente. El primero es herramienta y guía en la ardua labor emprendida por tantos científicos dedicados a desentrañar los misterios de la naturaleza a nivel microscópico, y que lleva finalmente a estructurar la mecánica cuántica. El segundo, que raya ya en lo filosófico, es el que nos permite, por lo menos, habituarnos a esta mecánica cuántica más que intentar comprenderla, como recomendaba a sus estudiantes el eminente físico soviético Lev Landau.

Pero volvamos al año de 1900. Es el del descubrimiento del cuanto de acción por Planck, lo cual, naturalmente, no afectó a Bohr quien apenas estaba entrando a la preparatoria, donde destacó tanto por buen estudiante como por buen futbolista. Lo que le enseñan es la física bien establecida y no cosas

esotéricas, que por cierto fueron ignoradas y desestimadas por la academia durante algunos años todavía.

En ese momento reina Newton —apoyado por Lagrange, Hamilton y otros— y se está afianzando Maxwell a su lado. Nuestra apreciación de la naturaleza está claramente fincada en cl concepto de materia ponderable —sólidos, líquidos y gases— por un lado y en el de radiación electromagnética —la luz—, por otro.

La ascendencia de la mecánica de Newton se basa en el éxito que tiene su aplicación sistemática a fenómenos muy distintos de los que la originaron. Maravilla el que con base en ella se empiece a dar una fundamentación microscópica a la termodinámica, esa bella y depurada rama de la física que ocupaba nicho aparte. Esta fundamentación la constituye la llamada teoría cinética de los gases, en la cual éstos son considerados como conjuntos de partículas moviéndose caóticamente y chocando unas con otras y con la pared del recipiente, de acuerdo con las leyes de Newton. Otros aspectos de la dinámica de los sólidos y de los fluidos, es decir, líquidos y gases, también se explicaban de acuerdo con la teoría newtoniana, aun cuando no requerían necesariamente de un modelo de partículas. Bastaba considerar una distribución continua de masa y subdividirla en elementos más o menos pequeños. Variando los grados de rigidez y/o de compresibilidad se conseguía una descripción unificada de las leyes de movimientos de los cuerpos sólidos por un lado y de las que gobiernan muchos de los aspectos de los flujos de líquidos y gases por otro (una clara excepción, por ejemplo, es el problema de la turbulencia, que a la fecha todavía no está resuelto; más aún, su planteamiento trasciende ciertamente el esquema newtoniano).

Pero además también está la descripción de la propagación del sonido a través de medios materiales, o de las ondas en un estanque. En estos casos, una acción externa sobre un sector del medio material origina un cambio de densidad o un desplazamiento de masa locales, que al restituirse a su condición inicial a su vez provocan lo mismo en el sector adjunto, y éste a su vez en el siguiente y así sucesivamente. Tenemos transferencia de energía sin transporte de masa. Cuando la acción externa se repite continua y periódicamente, generamos en el medio lo que llamamos una onda. Es característica fundamental de este tipo de fenómeno el que, al incidir en un lugar dos perturbaciones originadas en sitios distintos, éstas pueden o bien reforzarse o bien cancelarse, total o parcialmente; hablamos entonces de interferencia de ondas.

Lo anterior explica por qué se buscaba también un modelo mecánico y un medio apropiado —el éter o medio luminífero— para explicar la propagación de la luz.

En efecto, durante todo el siglo XIX se había ido afirmando el carácter ondulatorio de los fenómenos ópticos, descartándose el modelo corpuscular propuesto por Newton que no podía explicar manifestaciones como la interferencia y la difracción de la luz y otros más. Este proceso culmina con la identificación de la luz como onda electromagnética, en la síntesis que realiza Maxwell de los fenómenos eléctricos y magnéticos conocidos. De la observación de que corrientes eléctricas esto es, cargas eléctricas en movimiento, generan campos magnéticos en su vecindad y de que campos magnéticos variables inducen corrientes eléctricas en los materiales conductores, o sea campos eléctricos que ponen en movimiento las cargas, Maxwell intuye genialmente que esta concatenación de campos eléctricos y magnéticos ocurre aun fuera de la materia ponderable donde se encuentran las cargas eléctricas, para lo cual también propone la existencia de un "medio magnético". La ecuación que satisface esta concatenación es precisamente de la forma llamada ecuación de ondas y la velocidad de propagación del fenómeno es una constante, cuyo valor coincide con el de la propagación de la luz en el vacío. La generación de radiación electromagnética por cargas eléctricas en movimiento queda plenamente confirmada con los experimentos de Hertz, que incluyen el proceso complementario de inducción de corrientes eléctricas en conductores por la radiación incidente en ellos. Se abre la era del radio, las telecomunicaciones, la radioastronomía, etcétera.

A fines del siglo pasado impera, entonces, la sensación de que la tarea está prácticamente terminada en cuanto a la comprensión de la estructura fundamental de la naturaleza: materia con masa y carga eléctrica por un lado y radiación electromagnética por otro; todo regido por la mecánica racional y la

electrodinámica. La comprensión detallada de un fenómeno particular es sólo cuestión de aplicación sistemática de la teoría, con mayor o menor grado de dificultad. Lord Kelvin, en 1900, habla de un cielo despejado, si acaso con un par de nubecillas en la lejanía, que seguramente desaparecerán en breve. Pero esas nubecillas se convierten poco a poco en negros nubarrones.

El éter, o medio luminífero, y el medio magnético han quedado fundidos en uno solo. Pero su concepción como medio mecánico, con su gran peculiaridad de permear todos los cuerpos ponderables aparte de llenar el vacío, crea cada vez más dificultades a la teoría misma que sostiene con su atributo especial. Una consecuencia tal como que la velocidad de la onda debe ser afectada por el movimiento del medio en que se transmite, como pasa con las ondas sonoras, parece no cumplirse en el caso de la luz. Sólo la revolución de pensamiento que constituye la teoría de la relatividad de Einstein logra disolver este cúmulo.

En otra esfera, si las ondas de Hertz —como se les llamó entonces— se emiten y se absorben en cabal acuerdo con las leyes de Maxwell, otros fenómenos de emisión y absorción de luz por la materia parecen ignorarlas cabalmente. Por un lado cada elemento químico revela un patrón propio e inalterable de comportamiento, seleccionando frecuencias particulares de emisión y absorción. Por otro, la relación del espectro de frecuencias de emisión de cuerpos macroscópicos en función de la temperatura, revela características universales en franco desacuerdo con las predicciones de la teoría clásica, algunas tan descabelladas por cierto, como que la energía radiada sería infinita: esto se conoce como la "catástrofe infrarroja" en la teoría de la radiación de cuerpo negro. El esfuerzo de muchos físicos y químicos que recurren a explicaciones más y más complejas en su afán de salvaguardar el dogma clásico, aporta sin duda nuevos conocimientos. Pero la situación se complica cada vez más, al punto de requerir tratamiento de nudo gordiano; el cual es proporcionado por Planck y Einstein

En 1900, Planck muestra que la congruencia con la observación, en el caso de radiación de cuerpo negro, se logra si se acepta que la materia emite o absorbe energía electromagnética en "cuantos" de energía proporcionales a la frecuencia. La constante universal de proporcionalidad es la que conocemos como constante de Planck. Esto constituye una franca rebeldía contra los dictados de Maxwell.

Cinco años más tarde, en 1905, Einstein refuerza la osadía de Planck al señalar que su hipótesis permite comprender las características inesperadas del efecto fotoeléctrico, fenómeno que consiste en la liberación de electrones por un metal cuando incide sobre el la radiación electromagnética. Einstein inicia aquí sus trabajos sobre las hipótesis de Planck que le llevarán a concluir que hay que considerar a la radiación electromagnética, nuevamente, como un conjunto de corpúsculos, por lo menos en algunos fenómenos. Dado que no se pueden pasar por alto todos los fenómenos luminosos que tienen carácter ondulatorio, irrumpe así en la física la paradoja de la dualidad onda-corpúsculo en la descripción de la luz, paradoja que más tarde se hará extensiva a la materia.

Paralelamente a lo anterior se desarrollan toda una serie de experimentos que ahondan en la estructura fundamental de la materia. El descubrimiento de la radiactividad natural en 1887 por Becquerel, evidencia que los "átomos" de los químicos son a su vez sistemas compuestos. En 1897, Thompson identifica al electrón, partícula cargada negativamente, como una de los componentes. Con base en brillantes experimentos, Rutherford concluye en 1911 que la carga positiva que el átomo debe tener para neutralizar la carga negativa de los electrones, se encuentra concentrada en un muy pequeño y muy pesado núcleo central. Surgen el modelo planetario del átomo y una nueva paradoja.

En efecto, de acuerdo con la electrodinámica de Maxwell, un electrón en órbita debe emitir radiación continuamente e ir perdiendo energía hasta caer al núcleo. Lo cual ciertamente no ocurre, o no estaríamos aquí. Por otra parte, también existe una permanencia comprobada de las propiedades de los átomos. Una especie atómica nunca cambia intrínsecamente, en forma aislada de los procesos en que participe. El átomo de hidrógeno, por ejemplo, no ha variado de tamaño ni modificado sus frecuencias de emisión y absorción cuando, después de haber integrado infinidad de compuestos químicos, se le vuelve a aislar. Sus aventuras no le dejan huella. Esta es la problemática a que se enfrenta Bohr cuando en 1912 es invitado por Rutherford a integrarse al joven y entusiasta grupo de físicos reunido en su laboratorio, y donde, aun

siendo teórico, es bien recibido. Se cuenta que, habiendo alguien preguntado a Rutherford el porqué acordaba a Bohr un trato inusitado en él hacia los teóricos, respondió el gran físico experimental: "Es que Bohr es distinto: juega futbol."

Reflexionando sobre una solución a los problemas que plantea el modelo atómico de Rutherford, Bohr intuye que la restricción a absorción y emisión por "cuantos de energía" propuesta por Planck y Einstein puede ser la clave. Por lo pronto, si la energía que se libera al formarse el átomo debe corresponder a "cuantos de energía", la energía final del proceso o sea la del "estado permanente del sistema atómico" —como él lo llama— no puede ser cualquiera. Se convence de que la idea es correcta cuando —y esto es central en su artículo de 1913— la introducción de la constante de Planck junto con la masa y la carga del electrón en el cálculo de la órbita, le permite establecer una dimensión natural y por demás correcta para el átomo.

Cuando está concretando estas ideas y escribiendo el artículo, ya de vuelta en Copenhague, un colega le muestra la fórmula de Balmer para las frecuencias de las emisiones radiactivas del átomo de hidrógeno, fórmula publicada el año mismo en que nació Bohr. Al centrarse en las transiciones radiactivas, su perspectiva del problema se modifica, ampliándose considerablemente. El "estado permanente" aparece ahora sólo como el de menor energía entre muchos estados estacionarios o casi permanentes, del átomo. Enuncia entonces los postulados siguientes, de trascendencia histórica en la física moderna:

I. Que el equilibrio dinámico de los sistemas en los estados estacionarios puede discutirse con ayuda de la mecánica usual, mientras que el paso de los sistemas entre estados estacionarios diferentes no puede ser tratado en esta base.

II. Que este último proceso es seguido por la emisión de una radiación homogénea, para la cual la relación entre la frecuencia y la cantidad de energía emitidas es la dada por la teoría de Planck.

Puede reconocerse en estas afirmaciones la mezcla de audacia y de cautela que quienes lo conocieron dicen que era característica de Bohr. Y también ilustra lo difícil que es librarse de la autoridad del conocimiento adquirido.

Sostiene la validez de la mecánica de Newton y sólo suspende temporalmente la aplicación de la electrodinámica de Maxwell. Esta queda sustituida por la hipótesis de Planck, lo cual le permite destacar ciertas órbitas como las posibles trayectorias para el electrón en el átomo de hidrógeno. La diferencia de energías de estos movimientos, calculada con la mecánica clásica y transformada a frecuencia por la fórmula de Planck, reproduce sin más la fórmula de Balmer, inclusive cuantitativamente y ¡sin parámetros ajustables!

No le debió ser fácil a Bohr romper con Maxwell. Podemos citar al físico Oskar Klein que nos dice. "Recuerdo bien la gran admiración de Bohr por Einstein... Bohr, sin embargo, no podía acostumbrarse al concepto de 'cuantos de luz' de Einstein. . . Las objeciones de Bohr se originaban en su completa familiaridad con la teoría ondulatoria de la luz y, cuando se mencionaban estos casos (fenómenos con características corpusculares), acostumbraba subrayar la fantástica exactitud e integración de esta teoría en la explicación de muchos experimentos de propagación de la luz."

En la conferencia ante la Sociedad Danesa de Física en que expone por primera vez sus ideas, Bohr concluye en la forma siguiente: "Antes de terminar sólo quiero decir que espero haberme expresado con suficiente claridad, para que hayan ustedes apreciado a qué grado estas consideraciones chocan con el asombrosamente coherente grupo de conceptos que con propiedad reciben la designación de teoría clásica del electromagnetismo. Por otro lado, he tratado de comunicarles la impresión de que, haciendo hincapié en este conflicto, puede ser posible también, en el curso del tiempo, descubrir una cierta coherencia en las ideas nuevas."

Bohr acepta que debe haber cambios pero al mismo tiempo sabe que no se puede desechar, ni está dispuesto a hacerlo, todo lo anterior. Debe haber una coherencia entre lo nuevo y lo ya establecido. Bohr

no elucida las paradojas en el sentido de dar una explicación dentro de las teorías establecidas; lo que hace es señalar, con base en una intuición y un análisis brillantes, que hay que introducir elementos adicionales en nuestro esquema conceptual para poder tomar en cuenta los nuevos conocimientos. Y que el esquema ampliado, todavía por construirse, debe ser tal que corresponda al esquema clásico en todos los fenómenos en que éste ha demostrado su validez. Esta afirmación, conocida como el "principio de correspondencia", sirve de guía en la tarea —que se inicia en 1913— de encontrar la extensión apropiada.

Cuando esta tarea queda concluida, por lo menos en sus aspectos fundamentales, en 1927, se ha aceptado la necesidad de modificar no sólo la electrodinámica sino la mecánica misma, contrariamente a la idea original de Bohr. Han nacido la mecánica y la electrodinámica cuánticas.

Bohr participa como investigador y, sobre todo, como orquestador de los esfuerzos de los muchos investigadores que acuden a empaparse en la atmósfera del Instituto que ha creado en Copenhague. Cuando la paradoja de la dualidad onda-corpúsculo de los fenómenos electromagnéticos, que fue surgiendo en los años de 1900 a 1918, se extiende al ámbito de la materia en vez de desaparecer, es Bohr quien promulga la aceptación final de una nueva concepción de nuestro conocimiento de la naturaleza.

Sin dar un enunciado específico, Bohr estructura en diversas conferencias y escritos lo que hoy se conoce como "principio de complementariedad", que nos pide aceptar que la realidad física puede tener facetas en apariencia incompatibles pero en realidad complementarias, ya que no se pueden hacer evidentes simultáneamente. El *Contraria sunt complementa* inscrito en su escudo de armas, testifica sobre su convicción al respecto, surgida sin duda alguna de reflexiones profundas. Con referencia a lo que dije al principio de esta charla, recordemos aquí que, en la narración de una historia en una película, los diversos acontecimientos simultáneos que la integran deben necesariamente aparecer uno después de otro en la pantalla. En las películas del oeste, del cine mudo, el cambio de escena se anunciaba con un cartel que decía: "Mientras tanto, allá en la hacienda..." El sugerir que la afición al cine de Bohr haya podido influir en el enunciado de un principio tan profundo como el de complementariedad puede parecer irreverente. Sírvame, para atenuar la impresión, repetir una experiencia que relata el conocido físico Victor Weisskopff. Habiendo llegado al famoso Instituto de Copenhague para continuar su formación post-doctoral, le pareció a Weisskopff que el ambiente jovial e informal que imperaba no era lo apropiado a las cuestiones fundamentales y profundas que se debatían. Al comentárselo, con todo respeto, al director del Instituto, el profesor Niels Bohr, éste le respondió: "Mire, hay cosas tan serias, que realmente lo único que se puede hacer es bromear sobre ellas." Y quien sabe si, entre broma y broma...

Indice

Siguiente

SEGUNDA PARTE: LA CONTRIBUCIÓN DE BOHR A LA FÍSICA ATÓMICA

LA CONTRIBUCIÓN DE BOHR

A LA FÍSICA ATÓMICA

III. NIELS BOHR.

¿REVOLUCIONARIO O CONSERVADOR?

OCTAVIO NOVARO

A PRINCIPIOS de siglo, Bohr, Einstein y Planck, los tres físicos que propusieron la existencia de cuantos de energía, **E = *hv***, asumieron actitudes muy distintas ante el paso trascendental que daban para cambiar la concepclon de la naturaleza en forma radical, Planck ciertamente pareció titubeante mientras que Einstein fue extraordinariamente audaz. Citemos por ejemplo a Planck: "para introducir novedades uno debe proceder de la manera más conservadora posible". Por eso, de hecho, él sólo aceptaba la idea de cuantizar la energía para la emisión de radiación del cuerpo negro exclusivamente y en uno de sus trabajos llegó a poner en duda que dicha cuantización pudiera ser válida aun en el proceso inverso de captura de radiación en el mismo cuerpo negro. Y años más tarde diría, tal vez ya con nostalgia "las nuevas ideas no nacen completas y perfectas como Palas Atenea de la mente de Zeus".

Y sin embargo completa y perfecta parece haber nacido la idea de fotón de la mente de Einstein. En su trabajo original de 1905 sobre el efecto fotoeléctrico no sólo usó la fórmula **E = h*v*** (como antes la había usado Planck y después Bohr) que bastaba para todos sus propósitos, sino escribió $p = \frac{hv}{c}$, o sea que postuló la cuantización del impulso del fotón. Esta fórmula no la usó en su teoría del efecto fotoeléctrico, estaba allí como muestra de su seguridad en la realidad del fotón y sólo sería puesta a prueba veinte años más tarde para explicar el efecto Compton.

¿Cuál sería la mejor descripción de la actitud de Bohr ante su propia contribución decisiva, la explicación de los espectros atómicos discretos? ¿Revolucionario o conservador? De hecho su actitud fue intermedia entre la de Planck y la de Einstein. Aunque no rechazó totalmente el concepto de cuanto de energía electromagnética, tan evidente en el efecto fotoeléctrico, en realidad no quiso aceptar de una sola vez la realidad del fotón. Lo llamó un concepto auxiliar o simbólico, que al no ser observable en el límite clásico (es decir de las observaciones macroscópicas irreversibles) sólo se manifestaba indirectamente o como decía Bohr "debido al prejuicio de aplicar las leyes de conservación de la energía y el impulso".

Esta actitud de Bohr quedó ampliamente demostrada cuando el entonces joven Slater llegó a Copenhague con la ambiciosa idea de reconciliar los conceptos ondulatorio y corpuscular. Concebía la onda electromagnética como guía del fotón y le propuso a Bohr reemplazar los átomos por sistemas de osciladores que realizarían la emisión y absorción de la luz. Pero Bohr mutiló el modelo, eliminando al fotón y dejando sólo una descripción estadística de los osciladores con leyes de conservación también estadísticas. Esto apareció en el trabajo de Bohr, Kramers y Slater en *Nature*, con todo el dolor del corazón de este último. De tal forma Bohr estaba afirmando que no podía haber una correlación detallada entre las trayectorias del fotón y el electrón en el efecto Compton por ejemplo. Sabemos bien que el mismo Compton se encargaría de demostrar que la audaz proposición de Einstein $\left(p = \frac{hv}{c}\right)$era la correcta, dando de una vez por todas carta de existencia al fotón. Pero Bohr mismo todavía intentaría convencer a Pauli de no proponer la hipótesis de otra partícula "simbólica" como el neutrino para explicar el

decaímiento beta y le propuso en cambio sus leyes de conservación estadística, proposición que Pauli afortunadamente no aceptó.

Entonces los tres físicos que revolucionaron la ciencia con la fórmula **E = h*v*** tuvieron actitudes contrastantes ante su propia revolución. Sobresimplificando podríamos decir que Planck pareció casi arrepentirse de su audacia, mientras que Einstein la sostuvo con gran confianza en su inmenso genio. Bohr quiso atemperar los violentos cambios introducidos en los conceptos microscópicos exigiendo una cuidadosa correspondencia con la física clásica. Esto se muestra en las siguientes citas textuales: "Mi teoría no intenta explicar fenómenos en el sentido que la palabra explicación se usaba en la física clásica. Intento combinar varios fenómenos que parecían inconexos. Después de establecida la conexión podremos dar una explicación clásica." Y también: "Todo acontecimiento del que podamos hablar con un sentido físico, o sea todo fenómeno o medición experimental, debe ser descrito en términos clásicos." Y una más entre otras muchas: "Es decisivo reconocer que, no importa cuánto trasciendan los fenómenos la explicación clásica, la descripción de toda la evidencia debe ser expresada utilizando solamente conceptos clásicos."

Esta argumentación no pretende clasificar a Bohr como "conservador" y a Einstein como "revolucionario". En todo caso sirve para balancear la imagen opuesta, derivada de su famosa controversia sobre la interpretación de la mecánica cuántica. Esta imagen generalmente invierte los papeles de "revolucionario" y "conservador" antes mencionados. En realidad Bohr, como todo gran creador, mostró ambos aspectos en su amplia trayectoria. Y Einstein mismo nos hace el mejor elogio de la audacia del danés en sus comentarios sobre la teoría del átomo de Bohr: "La hipótesis de que la frecuencia radiada no depende en absoluto de la frecuencia del electrón en su órbita es un inmenso logro. La teoría de Bohr tiene entonces que ser correcta. Este es uno de los más grandes descubrimientos de la historia."

IV. NIELS BOHR, UN HOMBRE CON PRINCIPIOS

VIRGILIO BELTRÁN L.

Descubrir el mundo no es lo vital.

Ir de lo superfluo a la esencia.

Ya que todo cambia en nuestra presencia

no se acaba aún de hacer la realidad,

OSCAR LlERA en *El Lazarillo.*

LA FÍSICA es un conjunto de conocimientos congruentes sobre ciertos hechos reales. Su punto de arranque y de referencia frecuente es la experimentación; desconectado del experimento, el conocimiento físico no tiene sentido.

Este conjunto de conocimientos se construye sobre ciertas proposiciones fundamentales que llamamos principios. Mediante el razonamiento deductivo, al que se da precisión con el lenguaje matemático, se obtienen conclusiones, inferencias, implicaciones de esos principios y se hacen predicciones sobre resultados de nuevas observaciones y experimentos. Esto es el cuerpo de una teoría física, pero la piedra angular del conocimiento científico es el, o los principios fundamentales.

Los principios físicos constituyen las proposiciones iniciales del conocimiento deductivo y —en sí mismos— no pueden ser deducidos de otras proposiciones. Deben ser obtenidos por un arduo proceso inductivo que demanda conocimientos, experiencia y un talento especial, privativo del genio, para relacionar hechos aparentemente desconectados. En palabras de Luis de Broglie: "el razonamiento inductivo... se apoya sobre la analogía y la intuición... apela a la sagacidad del pensamiento más que al talento geométrico, busca adivinar aquello que aún no es conocido para establecer nuevos principios que puedan servir de base a nuevas deducciones..., la deducción es la seguridad, al menos en apariencia. la inducción es el riesgo. Pero el riesgo es la condición necesaria de todas las grandes proezas y por esto la inducción —al alejarse de las vías ya conocidas y porque intenta intrépidamente ensanchar los marcos existentes del pensamiento— es la verdadera fuente de los avances científicos."

Agradecemos la distinción, para honrar la obra del físico que, después de Einstein, más revolucionó a su ciencia en el siglo XX. Los párrafos anteriores fundamentan nuestra admiración por su obra: Niels Bohr tuvo los conocimientos, la experiencia, la perseverancia y el talento genial necesarios para establecer los principios no sólo de una nueva ciencia, sino de una que se aparta de los caminos aparentemente intuitivos que nacen del llamado "sentido común". Tuvo también la determinación y la convicción necesarias para hacerlos triunfar. Podemos afirmar en más de un sentido que Niels Bohr fue un hombre de principios.

Los principios más conocidos enunciados por Bohr son los que se refieren a la construcción del llamado modelo clásico del átomo. El primero de ellos, inspirado en los resultados experimentales de Rutherford, supone al átomo constituido por un núcleo masivo de carga positiva y electrones ligeros de carga negativa que se mueven a su alrededor como planetas mínimos. El segundo principio limita los estados dinámicos de estos sistemas planetarios atómicos a "una serie de estados correspondiente a una serie discontinua de valores de la energía (mecánica)..." El tercer principio incorpora la ley de Planck y el fotón de Einstein de energía $\mathbf{h}\boldsymbol{v}$ al proceso de conversión de energía mecánica a energía electromagnética por el sistema atómico: "... la radiación emitida o absorbida en una transición entre dos estados estacionarios... tiene una frecuencia $\boldsymbol{v}$ dada por la relación $\mathbf{E' - E'' = h}\boldsymbol{v}$... Estos dos últimos principios fueron inspirados por la ley

de combinación de Ritz para las líneas espectrales del hidrógeno en el espectro visible.

El segundo principio es de hecho, una condición sobre el sistema mecánico y requiere de una fundamentación adicional porque el modelo inicial se refiere a los estados de un sistema mecánico clásico —un sistema kepleriano— y en la mecánica clásica no hay razón para limitar sus estados dinámicos a "los correspondientes a una serie discreta de valores de la energía". Esta fundamentación se llama "cuantizacion" del sistema mecánico y no existen reglas para realizarla. Bohr cuantizó las orbitas planetarias enunciando el principio, más fundamental de que el ímpetu angular del sistema es un múltiplo entero de la constante de Planck (entre **2**π); pero, a pesar de su gran éxito en los átomos hidrogenoides, finalmente se debió concluir que esta cuantización es incorrecta. Con el advenimiento de la mecánica ondulatoria de De Broglie y la ecuación de Schrodinger los estados dinámicos quedaron limitados automáticamente a la serie postulada por Bohr y sólo se abandona el concepto clásico del electrón "planetario"

El tercer principio es fundamental en la teoría de la radiación y se separa radicalmente de la teoría clásica del electromagnetismo que asocia la frecuencia de radiación a la del movimiento mecánico, aunque también impone condiciones a este movimiento. Tanto este principio como los anteriores se conservan, en gran parte, en la teoría atómica moderna.

El modelo clásico del átomo alcanzó muchos triunfos porque sus principios tenían mucho de cierto; pero también fracasos porque no estaba apoyado sobre un modelo mecánico correcto. Este modelo y la mecánica cuántica en que se apoyaba, basada en cuantizaciones un tanto arbitrarias, tuvieron que ser abandonadas. La búsqueda de la nueva mecánica cuántica en que modernamente se apoya la física atómica estuvo fuertemente condicionada por la necesidad de salvar las dificultades que enfrentó la mecánica cuántica original. Bohr contribuyó a esta búsqueda con otros dos principios: el de complementariedad (1928) y el de correspondencia (1923).

El principio de complementariedad, desde la perspectiva de la mecánica ondulatoria, dirime la histórica controversia sobre la naturaleza ondulatoria o corpuscular de la materia En general los dos aspectos coexisten y son complementarios; mientras más preciso se hace uno de ellos a través de un experimento más se esfuma el otro. También salva el principio de causalidad si se acepta que la descripción de la naturaleza se haga en términos de funciones de estado y operadores en vez de la descripción clásica en términos de espacio y tiempo.

El principio de correspondencia hizo muchas cosas en favor de la física atómica, pero también de la teoría cuántica en general. La primera fue poner límites lógicos a la tarea de "adivinar aquello que aún no era conocido" de los fenómenos atómicos y subatómicos: la física clásica debería aparecer como un caso límite (asintótico) de la nueva física que se intentaba construir.

El principio de correspondencia fue el hilo de Ariadna para salir del laberinto de hechos aparentemente contradictorios. Por ejemplo, un modelo aceptable del átomo deberla poder ser estable mecánicamente (conservar su energía mecánica) y también inestable (capaz de convertir energía mecánica a energía electromagnética) Debería también poder convertir su energía mecánica a electromagnética como radiación a frecuencias discretas (componentes de Fourier) y también a frecuencias continuas (espectro continuo). El modelo atómico inicial de Bohr, inspirado fuertemente por la fórmula empírica de Balmer para la serie de líneas espectrales del hidrógeno en el visible, hacía todo esto y mucho más; fundamentaba el principio de combinación de Ritz, expresaba la constante empírica de Rydberg en términos de constantes fundamentales, predecía nuevas series espectroscópicas, etc. Los principios en que este modelo se apoyaba, sin embargo, diferían tan radicalmente de los conceptos mecánicos clásicos —al menos a primera vista— que hacían aparecer los resultados del modelo inicial de Bohr como fortuitos y rompían la unicidad de la física. La idea de correspondencia dio la salida del laberinto: El modelo debería también poder convertir energía mecánica a electromagnética —en frecuencia, intensidad y polarización— como un electrón cayendo clásicamente, en espiral, hacia su centro de atracción. Al demostrar que esto ocurre cuando el electrón se mueve en órbitas muy alejadas del núcleo Bohr unifica el modelo con el resto de la

física y da precisión matemática al principio de correspondencia.

El hilo de Ariadna ofrecido por el principio de correspondencia pudo así ser recorrido en sentido inverso; esto es, para adentrarse en el laberinto. Las llamadas "reglas de selección", que restringen a unos cuantos los posibles cambios de estado en la radiación atómica, fueron obtenidas con el principio de correspondencia y al notar la ausencia de algunas frecuencias (componentes de Fourier) en el análisis espectral de la radiación atómica. Muchas fórmulas correctas para la intensidad y polarización de la radiación atómica fueron obtenidas con el principio de correspondencia y el modelo atómico inicial del átomo antes del desarrollo de la mecánica cuántica moderna. Este principio fue tan fructífero que, de hecho, el primer paso para la formulación moderna de la mecánica cuántica —la condición hermitiana para los elementos de matriz de los operadores— se obtuvo con auxilio de este principio. En palabras de Condon y Shortley en su gran clásico *The Theory of Atomic Spectra*: "Bohr ofreció el principio de correspondencia solamente como su perspectiva intuitiva de que en esa dirección debería buscarse la nueva teoría cuántica; y fue en esa dirección que Heisenberg la encontró." Por lo que concierne a la física atómica en particular, el principio de correspondencia, con ligeras modificaciones, fue la base para construir la teoría de la radiación por átomos y moléculas.

El principio de correspondencia conecta las órbitas alejadas del núcleo con las órbitas clásicas; son las órbitas interiores, cercanas al núcleo atómico, las que muestran mas claramente el comportamiento cuántico. La más cercana al núcleo, en particular, es una órbita especial. Bohr la singulariza con un principio más: esta órbita es inherentemente estable en comparación con los demás estados estacionarios del átomo y "no posee probabilidad de transición espontánea a otros estados estacionarios". Tal principio se infiere necesariamente de la química: sólo así es posible formar compuestos químicos a partir de los elementos. Un gran triunfo posterior de este principio, de origen netamente atómico y espectroscópico, es que resulta necesario también para la teoría de las susceptibilidades magnéticas: Estas serán nulas para átomos con órbitas electrónicas infinitamente próximas al núcleo (teorema de Van Leeuwen) y no existirían sustancias magnéticas.

El menos conocido de los principios de Bohr es el llamado "principio de estabilidad espectroscópica". En el lenguaje formal de la mecánica cuántica este principio está implícito en la invariancia de cierta suma en las distintas representaciones matemáticas aceptables de un sistema, y su origen, profundamente intuitivo e inductivo, queda oculto bajo la apariencia de un resultado deducido de la matemática de esas representaciones.

El principio de estabilidad espectroscópica fue enunciado por Bohr para explicar —"independientemente de cualquier teoría" de radiación atómica— las intensidades relativas y la polarización de las componentes en que se dividen muchas líneas espectrales en presencia de campos externos eléctricos (efecto Stark) o magnéticos (efectos Zeeman y Paschen-Back); pero también se utiliza para calcular intensidades, en ausencia de campos externos, de algunas líneas particularmente difíciles. Recorriendo este principio —como el de correspondencia— en sentido inverso, Bohr pudo obtener "... información cuantitativa respecto a las probabilidades de transición entre distintos estados atómicos", válida para cualquier grado de aproximación.

La mayor utilidad del principio de estabilidad espectroscópica se obtuvo sin embargo, al aplicarlo a la teoría de las susceptibilidades eléctrica y magnética. Históricamente este problema contribuyó notablemente a marcar el fin de la llamada "teoría cuántica antigua" basada en el modelo atómico inicial de Bohr del electrón "planetario", y el nacimiento de la teoría cuántica moderna que incorpora el carácter ondulatorio de la materia. Los principios de Bohr asistieron crucialmente a este tránsito.

Al contemplar admirados la obra de Niels Bohr, su impacto y trascendencia y todos los elementos concurrentes para su realización no puede uno evitar preguntarse: ¿Existe en realidad una ciencia grande y una pequeña?..., ¿fue grande, o pequeña, la que hacía Bohr al desarrollar su átomo de hidrógeno?..., ¿y la que hizo Balmer al encontrar su fórmula, puramente empírica —tan importante para Bohr— fue una ciencia grande o pequeña?..., ¿y el principio de combinación de Ritz y la constante de Rydberg; eran

resultados grandes o pequeños? No se puede sino concluir que la ciencia, la física en particular, avanza con cientos, miles tal vez, de pequeños pasos que ocasionalmente producen los grandes resultados que atestiguamos en la gran obra de Niels Bohr.

Indice

Siguiente

V. EL PRINCIPIO DE CORRESPONDENCIA Y LA ESTRUCTURA DE LOS ÁTOMOS

EUGENIO LEY KOO

PARA discutir algunas de las contribuciones de Niels Bohr a la física atómica nos referiremos al periodo de 1913 a 1923 durante el cual trabajó inicialmente en Manchester y posteriormente en Copenhague. El influjo y la importancia de las ideas que el desarrolló en este periodo, y de sus aplicaciones, se pueden ilustrar a través de dos hechos. En el tercer Congreso Solvay, realizado en Bruselas en 1921 sobre el tema de "Electrones y Átomos", una de las discusiones principales se organizó en torno a su principio de correspondencia, y en 1922 se le otorgó el premio Nobel por sus contribuciones al entendimiento de la Estructura Atómica y la Radiación.

La situación que los físicos enfrentaron a principios del presente siglo, como se ilustró en la mesa redonda anterior, se puede caracterizar mediante las contradicciones entre algunos hechos observacionales y las predicciones correspondientes de las diversas ramas de la física clásica. En el problema de la estructura de los átomos este tipo de contradicción se manifestó al comparar la estabilidad de los átomos y los espectros atómicos discretos con las predicciones de la mecánica y la electrodinámica clásicas. De acuerdo con éstas, un electrón en el átomo al girar alrededor del núcleo describiría una espiral, precipitándose sobre el núcleo en un tiempo del orden de un cienmillonésimo de segundo, y emitiendo radiación con un espectro continuo de frecuencias.

Para resolver esta contradicción básica en el caso específico de la estructura atómica, Bohr adoptó una posición pragmática guiándose por los hechos observacionales y reconociendo la necesidad de reemplazar algunas de las ideas de la física clásica. Las investigaciones de Bohr en el periodo bajo consideración estuvieron orientadas hacia dos objetivos, uno general: construir una teoría cuántica y otro específico: explicar los espectros y la estructura de los átomos. A pesar de los éxitos que logró en sus intentos por alcanzar estos objetivos, las contradicciones persistieron e incluso se agudizaron, lo cual tal vez fue inevitable, antes de que pudieran ser resueltas. La resolución de esas contradicciones se dio en los años siguientes al establecerse la nueva mecánica cuántica, en la cual quedaron incorporados algunos de los principios que Bohr había propuesto, y también se reconoció la necesidad de abandonar algunos conceptos clásicos en el estudio de sistemas atómicos y subatómicos. Un mérito indudable de la obra de Bohr en esa época es la de haber servido de base y de estímulo para la generación de jóvenes físicos que contribuyeron a establecer la mecánica cuántica.

A continuación trataré de ilustrar la forma en que Bohr llevó a la práctica las ideas de que "se necesita una teoría para entender los fenómenos" y "se necesita un estudio detallado de los fenómenos para que se sugiera la teoría". Primero me referiré, en forma breve, al problema de los átomos con un solo electrón para complementar lo que ya se dijo en las intervenciones anteriores y también como base para discutir el problema de átomos con varios electrones.

En el caso del átomo de hidrógeno, la información espectroscópica. en la región visible podía reproducirse cuantitativamente a través de la fórmula empírica de Balmer, que expresa la frecuencia de las radiaciones emitidas o absorbidas por ese elemento químico como la diferencia entre dos términos, uno proporcional a $\mathbf{1/2^2}$ y otro proporcional a $\mathbf{l/n^2}$ donde $\mathbf{n = 3, 4, 5}$..., y siendo la constante de proporcionalidad la llamada constante de Rydberg, R. El principio de combinación de Ritz estableció en forma general que las frecuencias medidas de las radiaciones emitidas o absorbidas por los elementos químicos se pueden expresar como la diferencia entre dos términos, llamados términos espectroscópicos, los cuales toman una serie de valores característicos para cada elemento.

Desde su trabajo en 1913 sobre el átomo de hidrógeno, Bohr introdujo dos suposiciones que, por una

parte, contradicen a la mecánica y a la electromecánica clásicas, y por otra conducen a resultados consistentes con las observaciones experimentales. Una de ellas es el llamado postulado de estados estacionarios, en el cual se considera que los átomos existen en estos estados con energías bien definidas, y que la emisión o absorción de radiación están asociadas con transiciones entre dos de esos estados estacionarios. La segunda suposición es el postulado o relación de frecuencias que establece que la frecuencia de la radiación emitida o absorbida es igual a la diferencia de las energías de los estados estacionarios involucrados dividida entre la constante de Planck, h.

La selección de los estados estacionarios fue realizada por Bohr trabajando con las leyes de la mecánica y la electrodinámica clásicas e imponiendo el principio de cuantización de la acción, es decir que la acción ocurre solamente en múltiplos enteros de la constante de Planck.

Conviene señalar que estos postulados por ser contradictorios con la física clásica no fueron aceptados en un principio, pero su validez se reconoció eventualmente al comparar los resultados que se deducen de ellos con las observaciones experimentales.

La estabilidad de los átomos está garantizada por el postulado de los estados estacionarios y por la cuantización de la acción, al reconocer que de los estados estacionarios existe uno llamado estado normal en el cual el átomo tiene la energía más baja posible; en los otros estados estacionarios, de mayor energía, los átomos se dice que están excitados, y la tendencia natural es que realicen transiciones para pasar a estados estacionarios de menor energía hasta llegar al estado normal. Cuando se toma además en cuenta la relación de frecuencias se reconoce que se puede entender el principio de combinación de Ritz con base en la conservación de energía y la cuantización de la energía de la radiación, siendo los términos espectroscópicos simplemente las energías de los estados estacionarios divididas entre la constante de Planck.

En su trabajo inicial sobre átomos con un núcleo de carga + Ze y un electrón con carga 151e y masa m, Bohr supuso órbitas circulares. La cuantización de la acción en estas órbitas es equivalente a la cuantización del momento angular. Entre los éxitos inmediatos de su teoría podemos enumerar los siguientes. Se definieron escalas de los radios atómicos $\mathbf{r}_n = \mathbf{h_2 a_0/Z}$, en términos del radio de Bohr, $\mathbf{a_o = h^2/4\pi^2 me^2}$, y de las energías de los estados estacionarios $\mathbf{E_n = — Z^2 e^2/2a_o n^2}$. La aplicación del postulado de frecuencias permitió reproducir la serie de Balmer con base a transiciones entre estados estacionarios con **n = 3**, **4, 5**..., y **n' = 2**, incluyendo al valor numérico de la constante de Rydberg, $\mathbf{R= 2\pi^2 e^4 m/h^3}$, usando los valores medidos de las propiedades del electrón y de la constante de Planck. Al considerar transiciones entre estados estacionarios con **n > n' y n' = 1, 3, 4.**.., Bohr predijo, y efectivamente se observaron, otras series espectrales del hidrógeno en las regiones ultravioleta e infrarroja respectivamente. La serie espectroscópica en la región ultravioleta que Pickering había identificado en observaciones de algunas estrellas, y en la que las frecuencias eran aproximadamente cuatro veces las frecuencias de la serie visible del hidrógeno, fue correctamente identificada por Bohr como debida al helio una vez ionizado, cuya carga nuclear es Z= 2; además tomando la masa reducida del sistema atómico, en vez de la masa del electrón, se obtuvo el valor numérico de la constante de Rydberg correspondiente que coincidió con el valor observado en la serie.

Las ideas y los resultados de Bohr para átomos hidrogenoides se pudieron extender para describir e interpretar las frecuencias de los rayos X característicos de átomos con muchos electrones, proporcionando una base teórica para entender las regularidades que Moseley había observado al estudiar sistemáticamente los elementos a través de la tabla periódica y que llevaron a establecer que el número de carga Z coincide con el número de orden de cada elemento en la tabla periódica. La distinción entre los diferentes grupos de rayos X está dada tanto por los estados estacionarios involucrados en las transiciones respectivas, por ejemplo **K(n ≥2 → n' = 1)**, **L(n ≥ 3→ n' = 2)**, etc. como por las cargas efectivas, Zef, que es necesario asociarles para reproducir cuantitativamente las frecuencias. Bohr reconoció que la emisión y absorción de rayos X característicos dependen no solamente de la interacción de un electrón con el núcleo sino que involucran rearreglos de todos los electrones en el átomo. La información experimental sobre los rayos X lo llevó a establecer la existencia de grupos de electrones en los átomos.

Aunque los espectros ópticos de los elementos más pesados son más complicados que el del hidrógeno, Rydberg había establecido empíricamente que los términos correspondientes se podían escribir en la forma general $\mathbf{R/(n + \mu)^2}$. Bohr aplicó también sus ideas sobre el átomo de hidrógeno para asociar la producción de esos espectros con las transiciones entre estados en los cuales un electrón se mueve a distancias del núcleo que son mayores que las distancias de los otros electrones al núcleo. En tales estados ese electrón está sujeto a fuerzas ejercidas por el resto del átomo que son casi iguales a la atracción que ejerce el núcleo sobre el electrón en el átomo de hidrógeno a las distancias correspondientes.

En relación a los puntos señalados en los dos últimos párrafos es interesante señalar que esas ideas de Bohr siguen teniendo utilidad en dos espectroscopías atómicas modernas, con las adaptaciones apropiadas a cada caso. La primera corresponde a los llamados átomos exóticos, en los cuales el electrón es reemplazado por otra partícula cargada negativamente, o bien el papel del núcleo lo desempeña otra partícula cargada positivamente. Como ejemplos de partículas negativas se tienen muones, piones y kaones, con masas del orden de 210, 140 y 490 veces la masa del electrón; los radios de Bohr correspondientes son menores que el asociado al electrón por esos factores, respectivamente, y las energías de los estados estacionarios son mayores por esos mismos factores. Como el muón se comporta en sus interacciones en forma idéntica al electrón, el estudio de átomos muónicos ha servido para obtener información sobre la distribución de carga en los núcleos. El estudio de átomos piónicos y kaónicos proporciona información sobre las interacciones fuertes de esas partículas con los núcleos. Como ejemplos de partículas positivas se tienen el positrón y el muón; los átomos respectivos con un electrón, el positronio y el muonio, han servido para mediciones de alta precisión de propiedades de las partículas mismas y para explorar la validez de la electrodinámica. La segunda espectroscopía por mencionar es la de los llamados átomos de Rydberg, en los cuales un electrón es excitado a estados con números cuánticos muy grandes, **n—100**. Los radios de tales átomos son del orden de decenas de miles de veces mayores que los de átomos ordinarios, y el electrón excitado está muy débilmente ligado. En observaciones astronómicas se han identificado radiaciones asociadas a transiciones en átomos de este tipo. La producción y estudio de los mismos en el laboratorio se ha realizado en la última década gracias a la disponibilidad de láseres capaces de producir las excitaciones de manera controlada. La modificación de las propiedades de los átomos en presencia de campos eléctricos y/o magnéticos es un tema que estudió Bohr, y es el tema de interés presente en las investigaciones de átomos de Rydberg.

El éxito del trabajo de Bohr en conexión con el átomo de hidrógeno y su extensión a otros átomos, hizo que otros físicos tomaran en serio la validez de sus postulados. En particular, Arnold Sommerfeld, quien había estado dedicado a la física matemática, concentró su atención en el estudio de los problemas de la física atómica. Él llevó a cabo la extensión del trabajo de Bohr para el átomo de hidrógeno en dos direcciones. La primera para incluir órbitas elípticas, y la segunda para incorporar la corrección relativista a la masa del electrón, La cuantización de la acción para el movimiento radial y para el movimiento angular requieren la introducción de dos números cuánticos independientes, nr y k, respectivamente; si en vez del primero, se introduce al mínimo cuántico total n = $\mathbf{n_r + k}$ entonces se tiene que las elipses asociadas a los estados estacionarios tienen semiejes mayores que coinciden con los radios de las órbitas circulares de Bohr y la razón del semieje mayor al semieje menor es n/k, y las energías correspondientes son idénticas a las obtenidas por Bohr dependiendo sólo del valor del número cuántico principal. Nótese que para las órbitas circulares **n = k** y $\mathbf{n_r = 0}$. Como el núcleo ocupa uno de los focos de las elipses, mientras menor sea k, o sea el momento angular, mayor es la excentricidad, y el electrón se aproximará más al núcleo. Las órbitas lineales, con n = nr y k = 0, se eliminaron pues de otro modo el electrón golpearía al núcleo. El efecto de la corrección relativista es hacer que las órbitas elípticas adquieran un movimiento de precisión en su propio plano constituyendo una roseta como órbita resultante y en la que se identifican dos períodos de rotación independientes. Además la energía de los estados estacionarios depende no solamente del número cuántico principal n sino también del número cuántico angular k. La corrección relativista a la energía es pequeña por ser del orden de $\mathbf{(Z2\pi e^2/he)^2 = Z^2/137^2}$ veces la energía no relativista, donde c es la velocidad de la luz en el vacío. Las energías de los estados estacionarios obtenidas por Sommerfeld permitieron predecir la estructura fina observada en los espectros del hidrógeno y del helio ionizado. Los mismos resultados se extendieron para entender la estructura de los grupos K,

L..., de rayos X, para todos los elementos.

Antes de abandonar Manchester en 1916, Bohr había estado preparando la publicación de un trabajo titulado "Sobre la aplicación de la teoría cuántica a sistemas periódicos" que iba a consistir de cuatro partes. I Sobre la teoría general, II Sobre el espectro del hidrógeno, III Sobre los elementos con números atómicos mayores y IV Sobre la constitución de átomos y moléculas. Las dos primeras partes ya estaban aceptadas para publicación en el *Philosophica Magazine* y en la etapa de revisión de galeras. Al recibir copias de los trabajos de Sommerfeld, Bohr decidió suspender la publicación de su propio trabajo para hacer una presentación más completa incorporando las ideas de Sommerfeld. El trabajo lo publicó con el título *Sobre la teoría cuántica de los espectros de líneas* en Copenhague, las partes I y II en 1918 y la parte III en 1922; la parte IV no la publicó siguiendo el consejo de Sommerfeld. En la Colección de Obras de Bohr se destaca la conexión de las dificultades que enfrentó para escribir y completar este trabajo con su concepción, desarrollo y aplicación del principio de correspondencia.

Cabe mencionar en este punto las coincidencias afortunadas para los trabajos de Planck, de Rutherford y de Bohr sobre la cuantización de la radiación, la dispersión de rayos α por los núcleos atómicos y el átomo de hidrógeno, respectivamente, y sus consecuencias para el desarrollo de la teoría cuántica y sus aplicaciones a la física atómica de que sólo, precisamente para el oscilador armónico y para la interacción coulombiana entre dos cargas, la aplicación de la mecánica clásica junto con la cuantización de la acción conduce a los mismos resultados que el tratamiento cuántico riguroso. Fueron las coincidencias de estos resultados las que permitieron avances en la interpretación de los hechos observados. Las contradicciones en el uso de la física clásica y los postulados cuánticos persistieron.

En la introducción a *Sobre la teoría cuántica de los espectros de líneas*, Bohr señala explícitamente la limitación de su teoría del átomo de hidrógeno como una teoría válida para sistemas periódicos, y la posibilidad de extender la teoría a sistemas no periódicos, dando los créditos de tal extensión a Sommerfeld, cuya teoría ofrecía una clave para interpretar la estructura más complicada de los espectros de los otros elementos, a Epstein y Schwarzchild, quienes independientemente uno del otro habían explicado el efecto Stark que es el efecto de un campo eléctrico uniforme sobre el espectro del hidrógeno, y a Sommerfeld y Debye, quienes habían investigado el efecto Zeeman que es el efecto de un campo magnético uniforme sobre el espectro del hidrógeno. También reconoce que hay muchos problemas fundamentales sin resolver, no solamente en lo que se refiere a la aplicabilidad limitada de los métodos usados para calcular las frecuencias de los espectros, sino especialmente en lo que se refiere a la cuestión de la polarización y la intensidad de las líneas espectrales. Cita, sin explicitar, los trabajos de Ehrenfest sobre invariancia adiabática, y de Einstein sobre la deducción de la Ley de Planck para la radiación de cuerpo negro, como pasos importantes hacia el establecimiento de una teoría consistente. Concluye señalando que en el trabajo se mostrará que parece posible iluminar las dificultades básicas de la teoría cuántica tratando de trazar una analogía lo más cercana posible entre la teoría cuántica y la teoría ordinaria de la radiación.

En el átomo de hidrogeno, el electrón está sujeto solamente a la atracción coulombiana del núcleo, que es una fuerza central inversa del cuadrado de la distancia, y de ahí se deriva la periodicidad del sistema, y la simplicidad de su espectro. En el mismo átomo de hidrógeno, al considerar las variaciones relativistas de su masa o al someterlo a campos eléctricos o magnéticos, y en átomos con varios electrones, además de la atracción nuclear existen fuerzas adicionales sobre los electrones, lo cual se traduce en la pérdida de periodicidad en sus movimientos, y en los espectros más complejos. Inclusive en los casos en que actúan fuerzas adicionales, pueden existir ciertas cantidades dinámicas, los invariantes adiabáticos, que se conservan. Por ejemplo, si las fuerzas adicionales son centrales, el momento angular se sigue conservando; si se tiene el átomo de hidrógeno en un campo eléctrico uniforme, o en un campo magnético uniforme, la componente del momento angular a lo largo de la dirección del campo externo se sigue conservando. Sommerfeld, Epstein, Schwarzchild y Debye usaron la cuantización de las acciones asociadas a los invariantes adiabáticos para determinar los estados estacionarios de los sistemas atómicos que estudiaron respectivamente. Epstein y Schwarzchild reconocieron que los sistemas estudiados son de los llamados sistemas condicionalmente periódicos, para los cuales la ecuación de movimiento de Hamilton-Jacobi es

separable y en los que hay dos o más periodos independientes. Bohr adoptó esta aplicación combinada de la invariancia adiabática y la cuantización de las acciones asociadas, en lo que llamó el principio de "transformabilidad mecánica" de los estados estacionarios, como criterio para seleccionar tales estados de un sistema de entre la multitud continua de movimientos mecánicos posibles. Por cada invariante adiabático se tiene un número cuántico y también un periodo o frecuencia característicos para el movimiento de la coordenada generalizada asociada.

El principio de correspondencia desarrollado por Bohr en conexión con el problema de la radiación emitida o absorbida por sistemas atómicos tiene dos aspectos, uno asociado a las frecuencias de los espectros y el otro asociado a las intensidades y polarizaciones de las líneas espectrales. Por lo que se refiere al primer aspecto, Bohr desde 1913 ya había reconocido que hay una correspondencia entre su teoría cuántica y la teoría ordinaria de la radiación en el sentido de que "la frecuencia de la radiación emitida en transiciones entre estados estacionarios altamente excitados tiende a ser igual a la frecuencia predicha por la electrodinámica clásica". Para el aspecto de las intensidades, Bohr adoptó el concepto de probabilidades de transición, introducido por Einstein en 1916 en su deducción de la ley de Planck para la radiación de cuerpo negro a partir de los postulados de Bohr sobre estados estacionarios y la relación de frecuencias. Adicionalmente, y a falta de otra alternativa, Bohr regresó al uso de la electrodinámica clásica, no solamente en el límite asintótico de transiciones entre estados estacionarios altamente excitados, como en el aspecto de las frecuencias, sino también para transiciones entre estados con números cuánticos bajos.

De acuerdo con la mecánica clásica el movimiento de una partícula ligada se puede resolver en sus componentes armónicas, y si la partícula está cargada la electrodinámica clásica le asocia radiaciones cuyas intensidades y polarizaciones están determinadas por las amplitudes y direcciones de cada una de estas componentes armónicas.

La aplicación del principio de correspondencia de Bohr para determinar las frecuencias, intensidades y polarizaciones de las radiaciones que un sistema periódico o condicionalmente periódico puede emitir o absorber entre dos estados estacionarios, requiere reconocer las energías y las componentes armónicas de los movimientos clásicos asociados a cada estado, incluyendo las frecuencias características, los números cuánticos y las amplitudes y direcciones de las componentes armónicas. Por lo que se refiere a las frecuencias, éstas están determinadas por la relación de frecuencias y para transiciones entre estados con números cuánticos bajos difieren de las frecuencias predichas por la electrodinámica clásica, pero para transiciones entre estados con números cuánticos altos tienden a ser iguales a las frecuencias predichas por la electrodinámica clásica. En cuanto al segundo aspecto, Bohr propuso que la probabilidad de transición espontánea, y de aquí las intensidades y polarizaciones de la radiación emitida, están determinadas de acuerdo con las reglas de la electrodinámica clásica por los coeficientes de las oscilaciones armónicas en el estado estacionario inicial, siendo las componentes que participan en una transición determinada aquéllas cuyo orden de armonicidad está dado por las diferencias entre los números cuánticos de los estados inicial y final. En particular, si todas las oscilaciones asociadas a una posible transición tienen amplitudes nulas, la transición correspondiente no ocurrirá; esto permite explicar que no todas las transiciones consistentes con la relación de frecuencias, o el principio de combinación, ocurren en sistemas atómicos.

En el caso de sistemas periódicos, las aplicaciones del principio de correspondencia son claras e inmediatas. Efectivamente, en los ejemplos del rotador plano y del oscilador armónico, clásicamente se predicen radiaciones con la frecuencia del movimiento mecánico y múltiplos enteros de esa frecuencia; de acuerdo con el principio de correspondencia, debido a que el movimiento mecánico sólo contiene la componente fundamental, se espera que los sistemas cuánticos correspondientes solamente emitan o absorban la radiación correspondiente y no las otras. Para el rotador rígido, sólo en el límite de altos números cuánticos las frecuencias de las radiaciones emitidas o absorbidas tienden a ser iguales a la frecuencia de rotación; para el oscilador armónico todas las transiciones involucran radiaciones con la frecuencia de oscilación, lo cual justifica la hipótesis de Planck. En ambos casos se tiene la regla de selección $\Delta \mathbf{n} = \mathbf{n}_i - \mathbf{n}_f = \pm \mathbf{1}$ que restringe las posibles transiciones a aquéllas entre estados consecutivos.

Adicionalmente, para el rotador se tiene radiación circularmente polarizada y para el oscilador la radiación está linealmente polarizada.

Como ejemplo de la aplicación del principio de correspondencia a sistemas condicionalmente periódicos, inclusive cuando los números cuánticos no son altos, Bohr señaló el excelente acuerdo entre los cálculos de Kramers de las intensidades las componentes Stark de las líneas de Balmer **H**β**, H**γ**, H**δ del hidrógeno y las observaciones experimentales de Paschen. En cuanto a las polarizaciones se justificó la regla empírica propuesta por Epstein.

En el estudio del efecto Zeeman, Bohr reprodujo los resultados de Sommerfeld y Debye para las energías de los estados estacionarios, pero además explicó la no ocurrencia de ciertas transiciones así como la polarización de las radiaciones que sí son emitidas con base a la regla de selección Δ**m=0, ± 1** para la componente del momento angular a lo largo de la dirección del campo magnético. También señaló el acuerdo de los resultados de este tratamiento cuántico con los resultados del tratamiento clásico de Lorentz, y de ambos con la versión normal del efecto Zeeman en que cada línea espectral original se divide en tres componentes igualmente espaciadas.

En la versión anómala del efecto Zeeman cada línea espectral se puede dividir en números de componentes diferentes de tres, o se pueden tener tres componentes pero con espaciamientos diferentes. La estructura múltiple de las líneas espectrales se manifiesta inclusive en ausencia de campos externos. Por ejemplo, los elementos alcalinos presentan dobletes, el helio y los elementos alcalino-térreos tienen singuletes y tripletes, y en general los elementos con un número impar (par) de electrones presentan multiplicidades pares (impares). Solamente las líneas singuletes presentan el efecto Zeeman normal y las líneas con estructura múltiple presentan el efecto Zeeman anómalo.

En el caso de átomos con varios electrones, en contraste con el caso del átomo de hidrógeno, el problema mecánico no tiene una solución exacta conocida. Correspondientemente, Bohr y sus contemporáneos no disponían de un criterio para seleccionar los estados estacionarios de tales átomos. Desde 1916 Bohr y Kramers realizaron cálculos sobre la mecánica y la estructura del átomo de helio, pero sus resultados no fueron satisfactorios y no llegaron a ser publicados. Landé publicó un trabajo sobre la estructura del helio en 1919, lo cual motivó que estableciera una correspondencia con Bohr; ambos se encontraron al año siguiente, primero en Berlín, durante una visita de Bohr para hablar ante la Sociedad Alemana de Física sobre "Los espectros de series de los elementos", y después en Copenhague, durante una visita de Landé invitado por Bohr para hablar ante la Sociedad de Física de Copenhague sobre "Átomos cúbicos, sistema periódico y estructura molecular". Bohr y Kramers discutieron con Landé sobre sus respectivos cálculos para el helio. Bohr no estuvo de acuerdo con los cálculos de Landé, pero la discusión lo estimuló a trabajar sobre la estructura de átomos con varios electrones.

Bohr formuló el problema de la constitución del átomo en términos de la pregunta ¿Cómo se puede formar un átomo mediante la captura y ligadura sucesiva de electrones uno tras otro en el campo de fuerza que rodea al núcleo? En la búsqueda de la solución de este problema él se guió por la información experimental sobre los espectros, tanto ópticos como de rayos X, y sobre las propiedades químicas de los elementos a través de la tabla periódica, y por la interpretación y correlación de esa información con base a sus postulados cuánticos y el principio de correspondencia.

La similaridad entre el espectro del hidrógeno y el espectro de helio una vez ionizado, se extiende a otros sistemas como fue señalado por Sommerfeld y Kossel en 1919 en la llamada ley de desplazamiento espectroscópico. De acuerdo con esta ley el espectro de un átomo neutro con Z electrones es similar al espectro del ión de un átomo con carga nuclear Z + 1 y Z electrones. Esta propiedad de los espectros atómicos es un punto clave para entender la formación de los átomos en la manera sugerida por la pregunta planteada en el párrafo anterior.

Aunque, como ya se mencionó, no se tenía un método para determinar los estados estacionarios de átomos con varios electrones, Bohr infirió de los espectros atómicos la posibilidad de extender la caracterización

de esos estados en la forma en que Sommerfeld caracterizó los estados del hidrógeno. Entonces, el uso de los números cuánticos principal n y angular k es válido para caracterizar a los electrones en los átomos de todos los elementos a través de la tabla periódica, reconociendo desde luego que las energías asociadas a los estados correspondientes difieren de las del electrón en el hidrógeno debido a la presencia de los otros electrones. A esto lo llamó el principio de la existencia y permanencia de los números cuánticos.

La periodicidad de las propiedades espectroscópicas y químicas de los elementos a través de la tabla periódica fue un punto de orientación clave en la solución global que formuló Bohr para el problema de la estructura atómica. Tanto la información sobre los grupos de rayos X como la periodicidad de los elementos sugirieron la distribución de los electrones en grupos dentro de los átomos de los diferentes elementos.

La formación de esos grupos se relacionó directamente con la ocupación sucesiva de las órbitas electrónicas, a cada una de las cuales se le asocia una energía, $-Z^2_{ef}\, e^2/2a_0\, (n+\alpha_k)^2$ que toma en cuenta la presencia de los otros electrones para reducir la atracción nuclear efectiva y las desviaciones con respecto a una fuerza netamente coulombiana, y que determina el orden de llenado en los átomos sucesivos en su estado normal. Mientras en el átomo de hidrógeno la energía del electrón sólo depende del número cuántico principal en los otros átomos los electrones con el mismo valor n de este número cuántico y diferentes valores del número cuántico angular k tienen diferentes energías. Bohr asoció el origen de esta diferencia, en la que los estados de menor momento angular tienen menor energía, a la distinción entre órbitas penetrantes y no penetrantes. Efectivamente, mientras menor es el momento angular, mayor es la excentricidad de la órbita, y el electrón se acerca más al núcleo y siente más la atracción correspondiente en comparación con los electrones en órbitas de mayor momento angular y menor excentricidad. Usando la notación **n*k*** para designar las órbitas, en la Tabla 1 se ilustra en forma resumida los grupos y subgrupos que Bohr propuso en 1921 y el número de electrones en cada uno de ellos para los átomos a través de la tabla periódica.

En base a la aplicación de la teoría cuántica al problema de la estructura atómica Bohr encontró el camino para explicar las propiedades espectroscópicas y químicas de los elementos, relacionando la clasificación de éstos en familias y grupos con el llenado de las órbitas electrónicas sucesivas. Su predicción de que el elemento con número atómico 72, al que eventualmente se llamó hafnio, es homólogo del zirconio y no una tierra rara, y la comprobación por espectroscopía de rayos X de esta predicción dieron confianza en que efectivamente se tenía el camino correcto.

TABLA 1

Números de electrones en grupos y subgrupos de órbitas

n_k *(Bohr 1921)*

Elemento	Z	n_k																					
		1_1	2_1	2_2	3_1	3_2	3_3	4_1	4_2	4_3	4_4	5_1	5_2	5_3	5_4	5_5	6_1	6_2	6_3	6_4	6_5	6_6
Helio	2	2																					
Neón	10	2	4	4																			
Argón	18	2	4	4	4	4																	
Kriptón	36	2	4	4	6	6	6	4	4														
Xenón	54	2	4	4	6	6	6	6	6	6		4	4										

Radón	86	2	4	4	6	6	6	8	8	8	8		6	6	6			4	4			

A pesar del éxito global y cualitativo del trabajo de Bohr en su desarrollo de la teoría cuántica y su explicación de la estructura atómica, persistían muchos problemas sin resolver. Entre éstos ya se mencionaron la estructura de multipletes en los espectros atómicos y el efecto Zeeman anómalo. Landé trabajó sobre estos problemas, encontrando fórmulas empíricas que describían satisfactoriamente las observaciones, pero a costa de introducir un número cuántico adicional que a veces tenía que tomar valores semienteros. También ya se mencionó la falta cuantitativa de los cálculos para el átomo de helio.

Como se anticipó al principio, a mediados de la década de los veintes las contradicciones se habían agudizado, y el trabajo de Bohr estimuló su resolución. Pauli descubrió el principio de exclusión, Uhlenbeck y Goudsmit propusieron la existencia del espín semientero del electrón, Heisenberg y Born desarrollaron la mecánica matricial, De Broglie y Schrödinger desarrollaron la mecánica ondulatoria. La nueva mecánica cuántica nacía confirmando y validando muchos de los conceptos y resultados de Bohr, y también forzando el abandono de algunos conceptos e imágenes de la física clásica.

TABLA 2

Números de electrones en grupos y subgrupos de órbitas

nk *(1926)*

Elemento	Z	n_k																				
		1_1	2_1	2_2	3_1	3_2	3_3	4_1	4_2	4_3	4_4		5_1	5_2	5_3	5_4	5_5	6_1	6_2	6_3	6_4	6_5	6_6
Helio	2	2																				
Neón	10	2	2	6																		
Argón	18	2	2	6	2	6																
Kriptón	36	2	2	6	2	6	10	2	6													
Xenón	54	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	6									
Radón	86	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10	6			2	6			

Concluiré esta presentación señalando que en 1924 Main en la revista *Química e Industria*, y Stoner en el *Philosophical Magazine* propusieron distribuciones de electrones en subgrupos que diferían considerablemente de los propuestos por Bohr. Ellos también usaron argumentos basados en los espectros de rayos X y en las propiedades químicas de los elementos. Bohr aceptó en principio esa distribución, ilustrada en la Tabla 2 en su artículo sobre el átomo en la *Enciclopedia Británica* en 1926, y que se reconoce como la que sobrevivió.

TERCERA PARTE: LA CONTRIBUCIÓN DE BOHR A LA FÍSICA NUCLEAR

VI. LA LIBERACIÓN DE

LA ENERGÍA NUCLEAR: LA INFLUENCIA PERSONAL

DE NIELS BOHR

MARCOS MAZARI

INTRODUCCIÓN

EN LAS dos partes anteriores, vimos expuestas las ideas, conceptos y el principio de correspondencia, relacionando las líneas discretas espectrales con el modelo planetario estable del átomo Rutherford-Bohr y sus propiedades físicas y químicas, con los que Niels Bohr participó enormemente en la revolución científica de nuestro siglo, a veces calificada como el renacimiento de la física.

Nos toca ahora hablar sobre algo no menos importante, "La contribución de Bohr a la física nuclear", también rama discreta de la física que ha tenido papel trascendente en la ciencia, la tecnología e incluso ha modulado el desarrollo político histórico de la humanidad.

Empezaré con una breve introducción de la influencia que los conocimientos y personalidad de Bohr tuvieron en algunas aplicaciones de la llamada "energía-atómica" (más bien nuclear) con fines militares, precisamente durante la segunda Guerra Mundial.

1932 y 1939 son dos años cruciales en la historia de la física. En la primera fecha, Chadwick en el laboratorio Cavendish descubre el neutrón, partícula de gran importancia en la composición de la materia, capaz de usarse en la metodología de exploración de la estructura nuclear, la energía nuclear y sus aplicaciones. En la segunda fecha, O. Hahn y F. Strassmann, de Berlín, publicaron un artículo (en *Naturwissenschaften*) de máxima importancia en el que informaron se tenía ya evidencia química positiva para mostrar que uno, por lo menos, de los nuevos isótopos de los cuales se creía eran de un número atómico y masa mayor que el uranio, de hecho constituían un isótopo del elemento bario que tiene un número atómico y masa no muy diferente a la mitad de la del uranio.[1]

Con base en este descubrimiento, dos refugiados alemanes en Dinamarca, O.R. Frisch y L. Meitner, indicaron a Bohr el supuesto que pronto confirmaron, que la rotura de uranio bombardeado con neutrones en dos fragmentos parecidos, sólo podía significar que se daba una reacción nuclear muy diferente a las conocidas, con la liberación de una gran cantidad de energía.

Niels Bohr de Copenhague, Dinamarca, viaja por unos meses a los Estados Unidos para "discutir algunos problemas abstractos con Einstein". Llega el 16 de enero a Princeton donde se comunica de inmediato con su antiguo alumno J.A. Wheeler, quien pronto hace llegar la noticia a E. Fermi de la Universidad de Columbia. En enero 26 en una conferencia de física teórica en Washington, Bohr y Fermi discuten el problema que pronto se llamó de "fisión".

Durante el Congreso, Bohr y Fermi discuten el problema de la fisión y en particular Fermi menciona la posibilidad de que podrían emitirse neutrones durante el proceso. Aunque ésta era sólo una suposición, sus implicaciones de la posibilidad de una reacción en cadena era obvia.[2]

Con Wheeler desarrolla una teoría del proceso de fisión, de la que se hablará más adelante.

Casi al mismo tiempo, Frisch en Copenhague y F. Joliot en París, corroboran experimentalmente la gran energía liberada. Para junio de 1940 se sabía que el uranio (U), el torio (Th) y el protactinio (Pc) se rompían en partes aproximadamente iguales entre el selenio (Z =32) y el lantano (Z = 57), la mayoría radiactivos; que el torio y el protactinio se fisionaban sólo con neutrones rápidos y que la energía liberada era del orden de 200 MeV/evento.

El trabajo de muchos laboratorios fue, literalmente, explosivo. Más de cien artículos sobre la fisión nuclear se produjeron en menos de un año, resumidos en un artículo de revisión por L.A. Turner de Princeton, en la *Review of Modern Physics* (Dic. 39).

En conclusión: existía la esperanza de que fuera posible la utilización de la enorme energía contenida en la materia (1 kg de uranio equivale a 2 000 toneladas de TNT).

Al conocer la noticia de que el ^{239}**Pu** (Plutonio) era fisionable por neutrones lentos, un pequeño grupo de extranjeros, residentes en EUA, analizaron sus propiedades con fines militares: Szilard, Wigner (premio Nobel y que fuera profesor de Marcos Moshinsky), Teller, Weisskopf y Fermi. En Inglaterra, teóricamente analizan la masa crítica de una posible bomba atómica, Chadwick en Liverpool, Frisch y Peierls (profesor de A. Mondragón) en Birmingham. Se solicita a Bohr su cooperación para restringir las publicaciones sobre este tema, cosa que Joliot no acepta. Aparecen todavía varios artículos al respecto durante el año siguiente.

Mediante el empleo de moderadores de agua pesada, Joliot, Thompson y Fermi generan la idea de la liberación de energía en forma controlada, llevando su desarrollo a lo que conocemos ahora por reactores nucleares.

Todavía en los años 30, la investigación nuclear en Alemania no era intensa. Casi desde el principio de la guerra, llegan noticias a Alemania de que las autoridades militares norteamericanas asignaron fondos para la investigación atómica. Ante la posibilidad de que EUA e Inglaterra pudieran desarrollar armas nucleares, la Heereswaffenamt crea un grupo especial de investigación en Berlín-Dahlem bajo la dirección de Schumann (1939), con el objetivo de examinar la explotación técnica de la energía nuclear. El grupo lo forman Bothe, Clusius, Döpel, Geiger, Hahn, Harteck, Joos y V. Weizsäcker (de algunos de ellos oíremos más adelante).

El Kaiser Wilhelm Institut für Physik bajo el control del Departamento Alemán de Guerra (Heereswaffenamt), no pudo mantener en su puesto a su entonces director, Debye, por ser holandés. En 1939 ya se conocían claramente las dos líneas posibles de ataque, la ruptura del ^{235}**U** mediante una reacción no controlada de neutrones rápidos o la controlada por neutrones lentos. W. Heisenberg, de Gotinga, Alemania, ya había observado en 1939 que no bastaba agua normal para conseguir la reacción controlada, pero que sí era posible con el uso de agua pesada o carbono puro en capas (moderador), al analizar ya sea que el factor de multiplicación K de neutrones fuera mayor o menor que uno.

De Dinamarca, ocupada por los nazis, Bohr tuvo que escapar a Inglaterra en un pequeño bote a Suecia y de ahí en un avión británico. El gobierno inglés lo contrató como consultor en aspectos científicos, para los gobiernos de Inglaterra y Estados Unidos.

El desarrollo nuclear teórico y experimental se desarrolla desde 1944 con gran intensidad en el laboratorio de Los Álamos bajo la supervisión de J.R. Oppenheimer y S.K. Allison, encabezando H. Bethe, R.R. Wilson y E. Fermi varios grupos de trabajo. J. Chadwick de Inglaterra y N. Bohr de Dinamarca pasaban gran parte del tiempo en Los Álamos, adelantándose con rapidez y ventaja a los alemanes, con las consecuencias ampliamente conocidas.

Las experiencias vividas por algunos de nosotros durante la segunda Guerra Mundial aunque todavía muy jóvenes, nos permiten afirmar gracias a gentes del calibre de Einstein y Bohr, que de no haber ocurrido las cosas de este modo gozaríamos de una "libertad e independencia" bastante más restringidas que las actuales.

NOTAS

1 *Atomic Energy for Military Purposes, The Smyth Report. 1940-1945.* Apendice 7. " lngIaterra y la bomba atómica, agosto 12, 1945", colaboración tripartita EUA, Inglaterra y Canadá.

2 Ibid.

Indice

Siguiente

VII. BOHR EN LAS REACCIONES NUCLEARES

ARTURO MENCHACA ROCHA

INTRODUCCIÓN

LA PRIMERA evidencia de que se producen reacciones entre los núcleos atómicos data de 1919. Estudiando la interacción de partículas alfa en el aire, E. Rutherford detectó la aparición de radiaciones de alcance varias veces superiores a los de las partículas incidentes. Estos resultaron ser protones arrancados a los núcleos de nitrógeno por las partículas alfa.

Durante diez años continuaron utilizándose exclusivamente estas partículas, producto del decaimiento de núcleos radiactivos, para estudiar las reacciones nucleares con otros núcleos. Hacia fines de la década de los 20, tomaron impulso los proyectos tendientes a acelerar partículas electrostáticamente con el objeto de estudiar al núcleo en condiciones más favorables. Simultáneamente, se desarrolló la mecánica cuántica sentando las bases para el entendimiento de este nuevo tipo de fenómenos.

La primera mitad de la década de los treintas, en la que Bohr desarrolló su modelo sobre reacciones nucleares, ha sido uno de los lustros más efervescentes en el desarrollo de la ciencia nuclear. Se descubren el neutrón, el positrón, la radiactividad artificial, se construyen los primeros aceleradores de partículas, aparece en teoría satisfactoria sobre el decaimiento beta, etcétera.

Aquí revisaremos la aportación de Bohr (notas 2 y 3) al entendimiento de la dinámica de las reacciones nucleares. Para evaluar mejor esta parte de su obra, repasaremos primero los antecedentes[1] esenciales para el desarrollo de sus ideas; luego, describiremos, el contenido especifico de su trabajo y finalmente discutiremos la repercusión de su modelo en el desarrollo posterior de la física nuclear.

ANTECEDENTES

El descubrimiento del neutrón fue esencial para el entendimiento del núcleo. Los primeros indicios de la existencia de esta partícula fueron encontrados por Bothe y Becker, en Alemania, quienes, en 1930, anuncian la aparición de una radiación muy penetrante al bombardear berilio con partículas alfa. Intrigados por la naturaleza de estas radiaciones, Joliot y Curie realizaron estudios tendientes a determinar su naturaleza. Los resultados indicaron que se trataba de radiaciones eléctricamente neutras y con las cuales se podían arrancar protones de hasta 5.7 MeV a un blanco de parafina, concluyendo que se trataba de rayos gamma de muy alta energía (55 MeV). El mismo año, Chadwick y Feather decidieron comprobar la validez de esta hipótesis bombardeando blancos de un polímero cianurado, encontrando que las mismas radiaciones eran capaces ahora de arrancar núcleos de nitrógeno de hasta 1.2 MeV. De tratarse de gammas, estos deberían tener una energía muy diferente (90 MeV) a la necesaria para explicar lo observado anteriormente. Ante tal inconsistencia, Chadwick se dio cuenta que ambas observaciones podrían ser explicadas consistentemente sí, en lugar de gammas, se tratara de partículas neutras cuya masa fuera muy parecida a la del protón. El descubrimiento del neutrón resolvió muchos otros problemas conceptuales de la época, entre ellos la necesidad de suponer la coexistencia de electrones y protones dentro del núcleo.

Poco tiempo después, nuevamente Joliot y Curie encontraron que la emisión de rayos beta inducidos por el bombardeo con alfas en núcleos ligeros continuaba por algún tiempo después de haber retirado la fuente radiactiva, descubriendo así la radiactividad artificial. Esto abrió un nuevo campo, empezándose a estudiar radioisótopos con propiedades de decaimiento muy variadas y cuyos espectros de energía están íntimamente ligados a la estructura nuclear. El que algunos de estos nuevos elementos tuvieran vidas medias relativamente largas permitió, además, aplicar métodos químicos para estudiar los productos de

reacción.

Interesado en entender los trabajos que los Joliot-Curie efectuaban con radiaciones alfa, pero utilizando las nuevas partículas de Chadwick, Fermi inició un estudio sistemático de las reacciones inducidas por neutrones, exponiendo un gran número de blancos a neutrones producto de varias reacciones. El trabajo tan detallado del italiano reveló la fenomenología que sirvió de base a Bohr para su modelo de reacciones nucleares propuesto en 1936.[2]

A grandes rasgos, las evidencias encontradas por Fermi fueron: *a)* que los neutrones eran capaces de arrancar protones y alfas de casi cualquier material con probabilidad parecida a la de la dispersión elástica, dejando como residuos núcleos radiactivos con toda una variedad de vidas medias; *b)* que, si bien con probabilidad varias veces menor, los neutrones tendían a ser absorbidos por el blanco resultando solamente radiaciones gamma de energías muy definidas; *c)* que, al reducir la energía de los neutrones rodeando sus blancos con agua, la absorción de neutrones de baja energía variaba caprichosamente de un blanco al otro, en algunos casos superando enormemente la sección de dispersión elástica; *d)* que, esta absorción "selectiva" era muy sensible a la cantidad de agua, y por lo tanto, a la energía de los neutrones y *e)* que las diferencias entre la producción de alfas y protones tendían a disminuir al aumentar la energía de los neutrones a la vez que la producción de ambos tipos de partículas cargadas disminuía conforme se aumentaba la carga del blanco. Complementariamente, Ehrenberg descubrió la presencia de neutrones lentos en el bombardeo de blancos pesados, en los que el factor cinemático no justificaba una moderación tal de su energía, sugiriendo la posibilidad de colisiones inelásticas.

En el campo de las reacciones inducidas por partículas cargadas, la "carrera" de los aceleradores se había iniciado, también en 1932, con la primera desintegración artificial lograda por Cockcroft y Walton. Para 1935, los haces de partículas producidos por estos aparatos empezaban a competir ventajosamente con las fuentes radiactivas. Existían ya máquinas como el acelerador de Van de Graaff, capaz de entregar algunos microamperios de protones y deuterones de 5 MeV con alta resolución en energía, o el ciclotrón de Lawrence y Livingston que producía haces de hasta 6 MeV.

Los primeros resultados obtenidos con estas máquinas mostraban también que en el dominio de las reacciones nucleares a energías cercanas a la barrera coulombiana, también se inducían reacciones que tenían como resultado la emisión de protones, partículas alfa y radiación gamma, con secciones eficaces que variaban caprichosamente con la energía incidente.

Inicialmente atraídos por la absorción selectiva y por las grandes variaciones de las secciones de reacción con la energía, los primeros modelos teóricos de reacciones nucleares se basaron en posibles resonancias cuánticas, en que la partícula incidente era atrapada temporalmente por un potencial cuyos valores propios estaban relacionados directamente con las energías de las líneas observadas. Estos modelos, como Bohr indicó en su trabajo, reproducían sólo algunos aspectos de la fenomenología.

LA TEORÍA DE BOHR

Las ideas expresadas por Bohr en una conferencia impartida ante la Academia de Copenhague el 27 de febrero de 1936 "Captura de neutrones y constitución nuclear", publicada sólo dos días después en *Nature*,[3] integran la parte esencial de su aportación a la teoría de las reacciones nucleares. Como es típico de la obra de Bohr, la conferencia es puramente conceptual, no incluye una sola ecuación. Sus razonamientos sobre la dinámica de las reacciones nucleares se basa en las marcadas diferencias entre la fenomenología atómica y la nuclear.

En el caso atómico, la dispersión de electrones está dominada por un campo de largo alcance, el coulombiano, que modifica la trayectoria de la partícula incidente siendo poco probable una interacción más directa con las constituyentes individuales del átomo. Es más, aún cuando esto último ocurre, la transferencia de energía puede verse como un proceso de dos cuerpos interaccionando bajo la influencia del campo generado por el resto de los electrones. Esto, que es consecuencia de la relativamente baja densidad atómica, tiene como resultado que la sección eficaz para procesos elásticos domina sobre las de

procesos inelásticos como excitación, ionización y captura. En los términos de Bohr, el átomo es un sistema "abierto".

Las evidencias de Fermi indicaban que el caso nuclear refleja una naturaleza muy diferente, con secciones de reacción del orden de las elásticas o aún mayores. Ante esto, Bohr razona que, dada la densidad nuclear, la probabilidad de que un neutrón atraviese un núcleo sin interacciones directamente con uno de los constituyentes debería ser ínfima. Además, dada la naturaleza de corto alcance y la magnitud de la fuerza nuclear, una vez dentro seguramente se vería obligado a compartir su energía con el resto de los nucleones. El fenómeno de emisión, ya sea de partículas o de radiación gamma, se trataría entonces de un proceso estadístico complicado de desexcitación independiente. En este caso la probabilidad de emitir una partícula idéntica a la incidente, lo que sería el canal "elástico", compite con la de otros procesos energéticamente permitidos (evidencia *a)*). Los tiempos requeridos por este proceso, además, serían tales que la probabilidad de emisión gamma no sería tampoco despreciable (evidencia *b)*). En este sentido, para Bohr, el núcleo es un sistema "cerrado" en que las reacciones sólo se pueden llevar a cabo a través de la formación intermedia de un sistema compuesto relativamente estable cuyo decaimiento ocurre luego de un tiempo lo suficientemente largo como para poder ser considerado como un proceso dinámicamente independiente.

Bohr también hizo notar que las diferencias entre el caso atómico y el nuclear también se deberían reflejar en el esquema de niveles de ambos. En el átomo, por la naturaleza del campo coulombiano, la energía de ligadura de los diferentes electrones varía enormemente entre aquellos que se encuentran cercanos al núcleo y aquellos que se encuentran en la periferia. Dado que hay pocos electrones en las partes más externas, y están poco ligados, las excitaciones de baja energía tienden a envolver a electrones individuales siendo relativamente fácil liberarlos. Aun en el caso de excitaciones de electrones más internos al espectro de energías es bastante restringido.

Por otra parte, la idea de un "sistema compuesto", que corresponda a la formación de un ion negativo, es poco probable pues los niveles son escasos y, en todo caso, la energía del electrón incidente será en general mayor que la energía de ligadura correspondiente.

En el caso nuclear, el fenómeno de captura selectiva refleja algún nivel de respuesta resonante. Sin embargo, indica Bohr, estas resonancias no deben ser vistas como las de una partícula aislada en un pozo, ya que en ese caso la probabilidad de que esa misma partícula escape siempre será mayor que la de captura, en contraste con lo observado por Fermi. Las resonancias nucleares deben ser más complejas, de carácter colectivo. Al aumentar la energía incidente, la creciente variedad de maneras en que los constituyentes del núcleo pueden repartírsela debería reflejarse en un rápido aumento de la densidad de niveles que, sin embargo, se mantendrían relativamente angostos dada la baja probabilidad de concentrar suficiente energía en una sola partícula, con capacidad como para ser emitida.

Cabe recordar que la relación entre la "anchura" de un estado, es decir la máxima resolución en energía a la que se puede aspirar al observar su espectro y el tiempo promedio que el núcleo tarda en desexcitarse, está limitado por el principio de incertidumbre de Heisenberg: $\Delta\mathbf{E} = \Delta\mathbf{t} = \mathbf{h}$. En otras palabras, estados "angostos" corresponden a vidas medias largas y viceversa,

Por lo anterior, el espectro de niveles, aun a excitaciones relativamente altas, seguiría caracterizándose por líneas bien definidas (evidencia *c)*), hasta el punto en que la probabilidad de emisión de partículas se hiciera comparable. Esto explicaría la ausencia de absorción selectiva para neutrones no moderados aun cuando el espectro de gammas muestra líneas angostas (evidencia *d)*), fenómeno que sólo refleja la estabilidad del sistema compuesto. A energías suficientemente altas, la captura radiactiva disminuiría, dando lugar a la emisión de partículas, con un espectro de energías que incluya la dispersión inelástica tal como lo observó Ehrenberg.

En cuanto a la dependencia con la energía y con la carga del blanco de la emisión de partículas cargadas, Bohr las explica como simples reflejos de la diferencia entre la energía del estado y la barrera conlombiana

(evidencia *e)*). Estos efectos, dada la independencia entre la formación y el decaímiento del sistema compuesto, tendrían su equivalente en el caso de reacciones inducidas por partículas cargadas. Salvo esta diferencia, la dinámica de reacciones propuesta debería ser la misma, tal como se había observado.

Consciente del carácter puramente conceptual de su teoría, Bohr indica al inicio de su plática las dificultades de desarrollar una descripción detallada ya que, además de tratarse de un problema de muchos cuerpos, aún se desconocía la constitución misma del núcleo. A este respecto, menciona los riesgos de suponer la existencia dentro del núcleo de partículas idénticas a los protones y neutrones libres, en vista de que no hace mucho tiempo la idea de la existencia de electrones en el núcleo, para explicar el decaimiento beta, hubo de cambiarse por el de una creación en el momento de la emisión. Sin embargo, descarta la posibilidad, sugerida por el éxito de Gamow al describir el decaímiento alfa, de la existencia de esas partículas como tales dentro del núcleo.

Para concluir, Bohr especula sobre lo que ocurriría si la energía de las partículas incidentes fuera aumentada de unos cuantos MeV, accesibles en ese momento, a 100 y hasta 1000 MeV, prediciendo que aun a tales energías sobreviviría su sistema compuesto, aumentando solamente el número de partículas emitidas hasta el punto de provocar una verdadera explosión del núcleo.

Hacia 1939, junto con Peielrs y Placzek, Bohr[4] ya había desarrollado una primera formulación para calcular secciones eficaces en reacciones tipo núcleo compuesto, también llamadas fusión, en base a la sección de colisión del sistema ("canal") —proyectil-blanco— inicial y la probabilidad de decaímiento a través de las diferentes combinaciones posibles [núcleo residual-partícula emitida] evaluadas a través de las anchuras de los estados poblados en la región del continuo.

REPERCUSIÓN

La idea de la formación de un núcleo compuesto, mecanismo también conocido como fusión, fue acogida de inmediato. A pesar de la complejidad que este fenómeno implicaba, desde el punto de vista de una posible descripción microscópica el desacoplamiento entre la formación y el decaímiento, acarreó una simplificación en la formulación, dado que la segunda etapa del proceso había sido ya estudiada con bastante detalle. El descubrimiento posterior de otro modo de decaímiento, la fisión, reforzó aún más la naturaleza colectiva del núcleo.

Pasada la guerra, los esfuerzos para hacer una formulación cuantitativa de ese mecanismo de reacción avanzaron hasta alcanzar el nivel de la formulación cuántica de Hauser y Feshbach.[5] En ella, las probabilidades de reacción a través de uno de los posibles "canales" de entrada y uno de salida se expresan simplemente como el producto de la probabilidad de formación del núcleo compuesto, visto como el inverso de uno de los canales de decaimiento, por la probabilidad de decaimiento a través del canal final, normalizado por la probabilidad total de decaimiento. Este planteamiento expresa una ley de conservación del flujo.

Cabe señalar que la fusión, si bien es el mecanismo de reacción dominante a bajas energías, no es el único. Al aumentar la energía, los proyectiles son capaces de interaccionar directamente con algún, o algunos, de los nucleones superficiales del núcleo. Entre este otro mecanismo extremo y la fusión, en casos particulares, se han identificado otros mecanismos intermedios. Las especulaciones de Bohr respecto de la dependencia con la energía de la fusión han sido comprobadas ampliamente, llegándose a observar explosiones del núcleo. Estas últimas, sin embargo, resultan ser mucho más ricas de lo que, quizás pudo imaginar, por el hecho de que a partir de 150 MeV la creación de partículas elementales pasa a ser el modo preferencial de disipación de energía.

Aun cuando a la fecha no existe una formulación matemática detallada del proceso microscópico de la fusión, el éxito de la formulación de Hauser y Feshbach han permitido el cálculo aproximado de los espectros de decaímiento. La formación del núcleo compuesto también ha resultado ser un proceso

dominante en la interacción entre núcleos más pesados. Lo anterior, aunado a una antigua predicción del modelo de capas nuclear que sugiere la existencia de núcleos estables mucho más pesados que el uranio, ha causado recientemente gran interés por intentar fusionar núcleos muy pesados. Si bien esta última meta aún no se ha logrado, es claro que el mecanismo de reacción sugerido por Bohr hace casi 50 años no sólo dio una explicación coherente para una fenomenología que parecía extraña, sino que abrió un campo de investigación que hoy permanece abierto y activo.

NOTAS

1 Una revisión exhaustiva del estado de la física nuclear en la época se puede encontrar en: H.A. Bethe y R.F. Bacher. *Rev. of Mod. Phys.* VS. 8 (1936) 82; H.A. Bethe, *Rev. of Mod. Phys.* 9 (1937) 69; y M.S. Livingston y H.A. Bethe. *Rev. of Mod. Phys.* VS. 9(1937) 69.

2 N. Bohr, Nature 137 (1936)344

3 Ibid.

4 N. Bohr, R. Peierls y G. Placzek, *Nature* 144(1939) 200.

5 W. Hauser y H. Feshbach, *Phys. Rev.* 87(1952)366.

Indice | Siguiente

VIII. NIELS BOHR Y LA FISIÓN NUCLEAR

MARCOS MOSHINSKY

DURANTE los primeros veinticinco años de su vida científica, entre 1910 y 1935, Niels Bohr se concentró en comprender tanto la estructura electrónica de los átomos como la nueva mecánica que se requería para este propósito. Pero, desde su encuentro con Rutherford en 1912, nunca abandonó el interés por el misterioso núcleo alrededor del cual se movían los electrones.

De aquí a partir del descubrimiento del neutrón por Chadwick, en 1932, Bohr dedicó cada vez más atención a la posibilidad de comprender la estructura nuclear en una forma tan completa como antes lo había logrado para la atómica.

Una de sus primeras contribuciones en este campo fue "Captura neutrónica y estructura nuclear" [1] publicada en la revista *Nature* de febrero de 1936, donde estableció la idea de que las reacciones nucleares tienen lugar en dos pasos: *a)* La formación de un núcleo compuesto por los dos fragmentos que se ponen en contacto, en donde rápidamente la energía aportada se reparte entre todos los nucleones, y *b)* La desintegración del núcleo compuesto a lo largo de diversos canales como lo que se indica en la reacción del isótopo 12 del carbón bombardeado por neutrones y que lleva primero al núcleo compuesto $_{6}\mathbf{C}^{13}$ en un estado excitado,

$$ {}^{12}_{6}C_6 + n \rightarrow {}_{7}C_6^{13*} \rightarrow \begin{cases} {}^{12}_{6}C_6 + n \\ {}^{9}_{5}Be_4 + {}^{4}_{2}He_2 \\ {}^{11}_{6}B_5 + p \end{cases} \qquad (1) $$

donde los subíndices a la izquierda y derecha del elemento indican respectivamente el número de neutrones y protones. Las probabilidades de desintegración de los diferentes productos que aparecen a la derecha en la fórmula (1), son independientes del proceso que llevó a la formulación del núcleo compuesto, esto es, serían las mismas si se hubiera formado el $_{6}\mathbf{C}^{13}$, con igual energía de excitación, por ejemplo a través de la reacción de 4Be9 bombardeado con partículas α.

La idea de Bohr fue fundamental para explicar muchas características de las reacciones nucleares y en particular la presencia de resonancias, como ha sido tratada por Arturo Menchaca. En esta contribución quisiera analizar cómo Bohr implementó esas ideas en el proceso fundamental de la fisión nuclear combinándolas con la analogía del núcleo a una gota de líquido cargada.

Pero antes de entrar a la parte más técnica del análisis quisiera hacer un poco de historia sobre cómo fue descubierto el proceso de fisión nuclear y la excitación que provocó en los físicos y que luego se extendió a la humanidad toda por el impacto de ese descubrimiento.

La historia empieza en 1934 cuando Fermi, enterado de los experimentos de Joliot y Curie para producir radiactividad artificial mediante el bombardeo de partículas cargadas, decidió tratar de inducirla con neutrones. Tuvo gran éxito en su objetivo al estudiar sistemáticamente los elementos de la tabla periódica, notando en el proceso que si la energía de los neutrones se reducía por choques con protones en parafina o

en agua, la radiactividad inducida aumentaba grandemente. Al llegar al uranio, resultó que uno de los isótopos radiactivos producidos no pudo identificarse entre los conocidos en esa región de la tabla periódica y se llegó inclusive a pensarse que podría ser un nuevo elemento "transuránico".

El problema del uranio bombardeado con neutrones fue reexaminado: en 1938 por Otto Hahn y Lise Meitner, quienes encontraron de nuevo el misterioso elemento radiactivo de Fermi, así como muchos otros que no podían ser identificados con los cercanos al uranio en la tabla periódica. Las circunstancias políticas en 1938, cuando las fuerzas de Hitler ocuparon Austria, obligaron a Lise Meitner, que era judía austriaca, a abandonar Alemania. Hahn continuó sus experimentos con Strassmann para producir los misteriosos elementos transuránicos y finalmente logró que uno de ellos se precipitara con bario y vio luego que ningún procedimiento químico le permitía separar al "transuránico" radiactivo del bario mismo.

La conclusión era que en alguna forma un isótopo radiactivo de bario se producía al ser bombardeado el uranio con neutrones, lo cual parecía absurdo desde el punto de vista de la física nuclear de la época en que las reacciones con neutrones sólo habían llevado del núcleo bombardeado a núcleos vecinos en la tabla periódica de los elementos. Hahn escribió a Lise Meitner en Estocolmo sobre la paradoja que había encontrado y ésta, con su sobrino Otto Frisch, pronto llegó a la conclusión que posiblemente el uranio se había fisionado y uno de sus fragmentos era el bario. De inmediato Frisch regresó a Copenhague, donde entonces trabajaba, e informó a Bohr que estaba por salir a Estados Unidos para una estancia de varios meses. La reacción de Bohr fue: "Pero qué tontos hemos sido. Esto es maravilloso y justo como debe ser" y sugirió a Frisch y Meitner que inmediatamente escribieran una nota sobre el asunto.

Al llegar a Estados Unidos en enero de 1939, Bohr comunicó la noticia de la fisión del uranio con neutrones a los físicos norteamericanos que de inmediato lo comprobaron mediante diversos tipos de experimentos. En particular, Fermi, ya refugiado en Estados Unidos tras abandonar la Italia fascista, los continuó con entusiasmo.

Bohr decidió aplicar su modelo de la gota de líquido a la fisión nuclear y por cálculos realizados a bordo del barco que lo llevaba a Estados Unidos y continuados en Princeton donde permaneció varios meses en 1939, estableció para empezar que era el isótopo 235 del uranio el que fisionaba con neutrones lentos y luego desarrolló con Wheeler el trabajo "Mecanismo de la fisión nuclear" enviado al "*Physical Review*" a fines de junio de 1939, y publicado el primero de septiembre, al iniciarse la segunda Guerra Mundial. Poco se imaginaba Bohr que ese trabajo, además de afectar el curso de la física nuclear iba también a influir en la guerra y en la política futura del mundo.

Después de esta introducción quisiera dar brevemente algunos detalles sobre el modelo de Bohr sobre la fisión nuclear.

La interacción fuerte y de corto alcance entre los nucleones en el núcleo sugirió a Bohr que este último tendría más analogía con una gota de líquido cargada (ya que los protones tienen carga) que con un gas encerrado en una esfera. En efecto, para una gota de líquido, la excitación provocada en una de sus partes rápidamente se comunica al resto de la gota por el contacto directo entre las moléculas de la misma y su fuerte interacción, cosa que no sucedería con un gas. De allí que también la gota pierda rápidamente memoria del proceso que la excitó y sólo se ve afectada por la energía que se le proporcionó en ese proceso, lo que sucede también en el caso nuclear, como se indicó en el análisis de la fórmula (1).

Si tenemos una gota de líquido cargada, el equilibrio de la misma se debe esencialmente a la lucha entre dos fuerzas, la repulsión electrostática, que tratará de separar los constituyentes de la gota lo más posible, y la tensión superficial, que resiste toda deformación de la superficie que aumente el área de la misma.

La primera consideración que necesitamos hacer se refiere a la masa de los núcleos. Debido a que los electrones tienen una masa 1,837 veces menor que la de los protones, esta masa es prácticamente la del átomo, y puede medirse a través de alguno de los múltiples métodos de determinar la masa atómica. Pero es importante tener la fórmula semiempírica que nos permita, a través de la relación de Einstein $\mathbf{E = mc^2}$ entre masa y energía, determinar la masa aún para aquellos núcleos inestables en que ésta no puede ser

medida experimentalmente.

Vamos a dar la masa en unidades de energía. El núcleo está caracterizado por **A** nucleones de los cuales **N** son neutrones y **Z** son protones, **N + Z = A**. La masa entonces toma la forma:

$$\mathbf{M(A,Z)c^2 = Nm_nc^2 + Zm_pc^2 - u_vA + u_r(N - Z)^2A^{-1} + u_cZ^2A^{-1/3} + u_sA^{2/3} + \delta} \qquad (2)$$

donde c es la velocidad de la luz.

La masa proviene en primer lugar de la masa de los neutrones y de los protones, pero tenemos que considerar que esos neutrones y protones forman el núcleo por un proceso similar al de la condensación de las moléculas del vapor de agua cuando forman una gota de líquido. Ahora, la condensación libera calor en el caso de las moléculas, y lo mismo sucederá en el caso nuclear. Como esa energía no se da al sistema, sino que éste la da al medio, tiene que volverse negativa y es proporcional a A. La constante de proporcionalidad es $\mathbf{u_v = 14\ MeV}$ donde **MeV = 1.6 x 10^{-6} ergs**. Viene después lo que podríamos llamar la energía de simetría proveniente del hecho que los núcleos de igual A (isóbaros), son más estables mientras más cercano esté entre sí el número de protones y neutrones. Más estables significa de menor energía y, por lo tanto, de menor masa, y esto se traduce en el hecho que halla un término proporcional a $\mathbf{A^{-1}(N - Z)^2}$, como una teoría más detallada puede mostrarlo. Viene posteriormente la fuerza electrostática; para una esfera uniformemente cargada de carga **Ze** y radio $\mathbf{R = r_0A^{1/3}}$ (se supone que la densidad de la materia nuclear se mantiene aproximadamente constante, y por lo tanto el radio del núcleo es proporcional a A1/3), su contribución a la energía del núcleo es:

$$\mathbf{(3/5)R^{-1}\ Z(Z - l)e^2 = 4u_cA^{-1/3}Z^2\ ,\ donde\ u_c=0.146\ Mev}. \qquad (3)$$

El penúltimo término de (1) proviene del hecho que al "condensar" los nucleones, obtenemos menos energía de los nucleones que quedaron en la superficie, que de aquellos que quedaron en el interior del núcleo. Es necesario corregir entonces el término negativo $\mathbf{-u_vA}$, por un efecto superficial que será proporcional al área y, por lo tanto a $\mathbf{A^{2/3}}$. El coeficiente de proporcionalidad de ese término superficial es $\mathbf{u_s = 13\ MeV}$. Finalmente, del hecho que los nucleones tienen spin, y del principio de exclusión de Pauli, se puede demostrar que los núcleos son particularmente estables si contienen un número par de protones Y neutrones, es decir, si N y Z son pares, en cambio son particularmente inestables si N y Z son nones. Esto se refleja en el término δ de la fórmula (1) que es igual a:

$$\delta = \begin{cases} -1/2\ \text{MeV} & \text{Si N, Z par,} \\ \quad 0 & \text{si N par, Z non, o viceversa} \\ 1/2\ \text{MeV} & \text{si N, Z non,} \end{cases} \qquad (4)$$

La fórmula (1), conocida con el nombre de fórmula semiempirica de Weizacker[2] por el nombre del físico que la propuso originalmente, contiene una gran cantidad de información de interés. Consideremos, por ejemplo, la diferencia de energía entre un núcleo de número de masa A (consideremos N y Z pares), y dos

fragmentos de masa $A' = \frac{A}{2}$, con $N' = \frac{N}{2}$, $Z' = \frac{Z}{2}$. Despreciando el efecto de los términos; δ, tenemos de (1) que:

$$\mathbf{M\,(A, Z)\,c^2 - 2M\,[(A/2), (Z/2)]\,c^2 = u_s A^{2/3}\,(1 - 2^{1/3}) + u_c A^{-1/3} Z^2\,(1 - 2^{-2/3})} \qquad (5)$$

Como $\mathbf{(1 - 2^{1/3}) < 0}$ y $\mathbf{(1 - 2^{-2/3}) > 0}$, el signo de (5) dependerá de cuál de los coeficientes de los paréntesis es mayor. Para núcleos pesados, el término electrostático $\mathbf{U_c Z^2 A^{-1/3}}$ es mayor que el término de tensión superficial $\mathbf{U_s A^{2/3}}$, y el miembro izquierdo de (5) es positivo, lo que implica que la fisión de un núcleo pesado es exoérgica.

Para el uranio se puede calcular de (5), que la fisión libera cerca de 200 MeV y teniendo en cuenta esa diferencia de energía, nos preguntamos qué impide que el núcleo de uranio se fisione inmediatamente, y que el uranio hubiera desaparecido de La Tierra. Aquí el modelo de la gota de líquido vuelve a ayudarnos.[3] Al deformarse la gota de líquido, sigue los pasos de la Figura 2. Al principio, al alargarse la gota disminuye la energía electrostática, pero aumenta la tensión superficial, y un cálculo elemental para un elipsoide muestra que para un núcleo como el uranio, aumenta más rápidamente la tensión superficial que lo que disminuye la repulsión electrostática, de manera que la energía total del núcleo aumenta con la deformación hasta que el núcleo toma la forma (d) de la Figura 2 en que los fragmentos están en contacto. Posteriormente, disminuye la energía al disminuir la repulsión electrostática sin cambiar la tensión superficial. Si designamos por r a un parámetro que mida la deformación del núcleo, y posteriormente la distancia entre los fragmentos del mismo, la variación de la energía con la deformación está indicada por la curva (a) de la Figura 3, en la que el valor **r = R** corresponde al radio del núcleo no deformado. De la curva (a) se ve claramente que, por lo menos desde el punto de vista de la mecánica clásica, el núcleo es estable contra la fisión, a pesar de que la energía de los dos fragmentos es menor que la del núcleo original. Si en lugar de una curva del tipo (a), tuviéramos una del tipo (b) o (c) de la Figura 5, cosa que ocurriría para núcleos con cargas bastante mayores que las del uranio, los núcleos serían inestables a la fisión. La última parte de la curva (a) proviene simplemente de la energía electrostática de repulsión entre los fragmentos y por lo tanto, va como **r-1**.

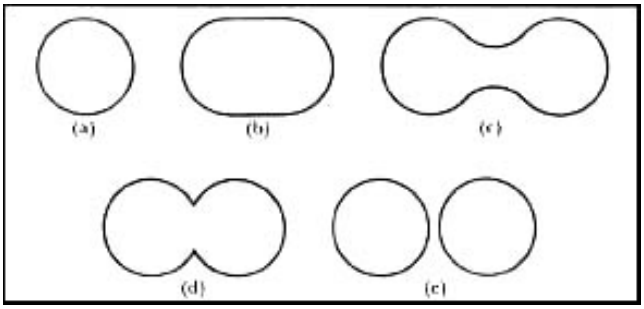


Figura 2.

De la curva (a) en la Figura 3, vemos que al núcleo hay que proporcionarle una energía **ΔE** para que ocurra la fisión, y se puede estimar esa energía de la diferencia de energías entre los dos fragmentos en contacto de la Figura 1(d) y el núcleo original de la Figura 2 (a). Esta estimación puede hacerse con ayuda de la fórmula (5), si le agregamos la energía electrostática de dos cargas $\left(\frac{Ze}{2}\right)$ cuyos radios son $R' = r_o\left(\frac{A}{2}\right)^{1/3}$ y que está en contacto, de manera que de (2) y (5) se tiene:

$$\Delta E = (5/6)\,(Z/2)^2\,(A/2)^{-1/3}\,U_c - \{M(A, Z) - 2\,M\,[(A/2), (Z/2)]\}c^2 \qquad (6)$$

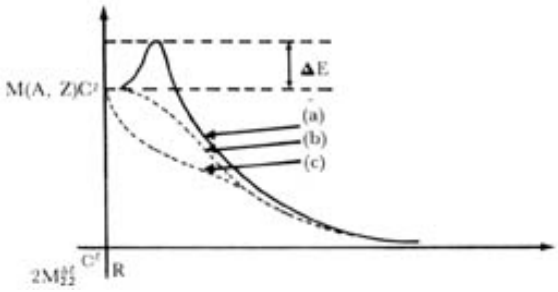


Figura 3.

De (6), y con algunas correcciones apropiadas para los núcleos pesados,[3] se estiman las energías **ΔE** dadas en el primer renglón de la Tabla 1:

TABLA 1

	$_{92}U^{236}$	$_{92}U^{236}$	$_{90}Th^{233}$
ΔE (Mev)	5.2	5.8	6.8
E_{exc} (Mev)	6.4	5.2	5.2

TABLA 2

$Th^{232} + n \rightarrow Th^{233} \rightarrow -Pa^{233} \rightarrow -U^{233}$	1.63×10^5 años
$U^{236} + n \rightarrow U^{239} \rightarrow -Np^{239} \rightarrow -Pu^{239}$	2.41×10^4 años

¿En qué forma podemos proporcionar a los núcleos la energía AE que necesitan para que se produzca el proceso de fisión? El método más directo es el de bombardearlos con neutrones produciendo, como habíamos indicado antes, un núcleo compuesto de A + 1 nucleones. Este núcleo compuesto no se encuentra en su estado de más baja energía sino en un estado excitado, y en el supuesto que la energía cinética del neutrón sea muy pequeña, esta energía de excitación puede estimarse de la diferencia entre la masa del núcleo original, más la masa del neutrón, menos la masa del núcleo compuesto en su estado base, y todo multiplicado por c2 es decir:

$$E_{exc} = M(A,Z)c^2 + m_n c^2 — M(A + 1, Z)c^2 \qquad (7)$$

Las masas **M(A, Z)** y **M(A + 1, Z)** se obtienen de (2) y las energías de excitación están dadas en el segundo renglón de la Tabla 1.

Cuál es la razón de la diferencia de 1 Mev que se observa[4] entre la energía de excitación del $_{92}U^{236}$ y del $_{92}U^{239}$. El isótopo 236 del uranio se forma del isótopo 235 con la absorción de un neutrón. Ahora bien, el Uranio 235 tiene N par y Z non, mientras que el U^{236} tiene N y Z par. De la fórmula (1) vemos que el término δ da una contribución ≈ **1/2 Mev** a la energía de excitación. En cambio el U^{239} se obtiene del U^{238} cuando éste absorbe un neutrón. Como el U^{238} tiene Z, N pares, y el U^{239} tiene Z par y N non, tenemos de (la) que δ da una contribución de ≈ — **1/2 Mev**, y de aquí se ve la razón del 1 Mev de diferencia en la E_{exc} del U^{238} y U^{239}. Comparando E_{exc} con ΔE, vemos que U^{235}, al absorber un neutrón lento, da un núcleo compuesto U^{236} con suficiente excitación para fisionarse, mientras que tal cosa no pasa con el U^{238} al absorber un neutrón, ya que $\Delta E > E_{exc}$ para el U^{239}. Sin embargo, si el neutrón llevara una energía cinética superior a 1 Mev, sí podría dar una energía de excitación suficiente para que se fisionara el núcleo compuesto U^{239}.

De los materiales presentes en abundancia razonable en la naturaleza, sólo el U^{235} es fisionable con neutrones lentos. Sin embargo, las razones expuestas en el párrafo anterior nos hacen ver cómo pueden producirse artificialmente núcleos fisionables con neutrones lentos. En la Tabla 2 indicamos dos reacciones nucleares de interés, una del U^{238} que, al capturar un neutrón forma U^{239} que se desintegra emitiendo un electrón dando Np^{239}, y finalmente éste se desintegra emitiendo otro electrón para producir el isótopo 239 del plutonio Pu^{239}, cuya vida media es 2.41x 104 años. La otra reacción que ocurre en forma similar, nos da, a partir del $_{90}Th^{232}$ más un neutrón, el $_{92}U^{233}$, con cuya vida media de 1.63x105 años. Ahora bien, Pu^{239} y U^{233} tienen Z par y N non, y los correspondientes núcleos compuestos tienen N, Z par. Como en el caso del U^{235} del párrafo anterior, esperaríamos ganar 1 Mev en la energía de excitación por la contribución del término δ en (1), y por lo tanto, estos núcleos Pu^{239} y U^{233}, producidos artificialmente, son fisionables con neutrones lentos.[4]

En la primera mitad de 1939 Bohr desempeñó una vez más el papel de profeta que enseñaba el camino a la tierra prometida. En este caso en la comprensión del fenómeno de la fisión nuclear, como antes lo fue en la estructura del átomo, o dirigiendo las intensas discusiones sobre la interpretación de la mecánica cuántica.

Es difícil darse cuenta hoy en día de la excitación producida por el fenómeno de la fisión nuclear en 1939. Desde el punto de vista de la física ha habido varios descubrimientos, que podríamos llamar "inesperados", cuya importancia es comparable. Pero aquí se tenía la posibilidad de un impacto social inmediato, sobre todo cuando las mediciones y la teoría fueron mostrando que se producía más neutrones que las que se absorbía para fisionar el ^{235}U. Este resultado puede concebirse desde el punto de vista de la gota de líquido, por las pequeñas gotitas que acompañan a los fragmentos principales cuando ésta se fisiona. Más exactamente argumentos de termodinámica, mecánica estadística y física nuclear[5] aclararon en pocos meses que los neutrones emitidos en cada proceso de fisión serían suficientes para sostener una reacción en cadena.

Al comprenderse lo anterior la excitación de los físicos empezó a convertirse en preocupación. Rápidamente comprendieron que no sólo se tenía en principio un mecanismo totalmente nuevo para producir energía sino también que se podía elaborar explosivos de potencia increíble.

Bohr regresó a Dinamarca a mediados de 1939 y la guerra y luego la ocupación nazi de su país lo

desconectaron de los progresos en el campo de la fisión. El temor de que Alemania, donde habían surgido los conocimientos iniciales en ese campo, a través de Hahn y Strassmann, pudiera desarrollar una bomba, hizo que los físicos norteamericanos y británicos se autocensuraran, en el campo de la fisión y sus aplicaciones. No fue sino hasta 1943, cuando Bohr escapó de Dinamarca a Suecia y de allí en un avión de la inteligencia británica a Inglaterra, cuando se enteró de los enormes progresos realizados en el campo de la fisión nuclear así como de los enormes peligros que implicaban. Como he contado en el prólogo de este libro Bohr, más qué con su conocimiento técnico, ya entonces rebasado, contribuyó con su esfuerzo para tratar de lograr un desarrollo pacífico de la energía nuclear. Si por una vez fracasó, fue por el cúmulo de fuerzas que se opusieron a su acción, y no por falta de dedicación y entusiasmo de su parte.

Fue pues Bohr, como Einstein y algunos de los otros gigantes de la física de nuestra época, un profeta que se preocupó hondamente no sólo del camino futuro de la física, sino del tortuoso que la humanidad sigue en busca de una vida mejor.

NOTAS

1 N. Bohr, Nature 137,344 y 351 (1936),' N. Bobr y F. KaIckar, KIg. "Danske Vid" Selkskab. *Math. Phys. Medd. 14,*Núm. 10 (1937).

2 F. Weizsacker, Z. *Physik 96,* 431(1935).

3 Niels Bohr and J.A. Wheeler, *Phys*. Rev. 56, 426 (1939)

4 N. Bohr, *Phys. Rev. 55,* 418(1939).

5 H.D. Smyth, *Rev. Mod. Phys. I7,* 351 (1945).

CUARTA PARTE BOHR Y LA FUNDAMENTACIÓN DE LA MECÁNICA CUÁNTICA

IX. LA CONTRIBUCIÓN DE

NIELS BOHR A LA

MECÁNICA CUÁNTICA

LEOPOLDO GARCÍA-COLÍN

INTRODUCCIÓN

PARA presentar en una versión integrada y coherente las ideas que llevaron a Niels Bohr a pensar en los problemas que se originaron a principios de siglo con la introducción del cuanto de luz por Planck en 1900 y por Einstein en 1905, con lo cual la teoría corpuscular de la luz volvió a cobrar fuerza, necesitaríamos escribir toda una obra de física teórica, complementada por otra, no menos ambiciosa, de física experimental. Así que, para ahorrar espacio y tiempo, tomaremos aquí como punto de partida los años de 1917-1918 cuando ya las aplicaciones de la teoría de los cuantos a la física atómica habían dado muchos frutos y la interacción entre la materia y la radiación, formulada por Einstein en 1917, establecía con toda claridad la relevancia de la llamada fórmula de Planck. Los lectores interesados en adquirir mayores conocimientos sobre el desarrollo de la física en los años de 1900 a 1917 deben consultar el material concerniente a las dos primeras partes de este libro.

La primera idea introducida por Bohr, y que desempeña un papel fundamental en la comprensión de la mecánica cuántica, es el llamado principio de correspondencia. Este principio tiene un contenido muy simple: considérese dos estados estacionarios de un átomo con energías digamos, $\mathbf{E_1}$ y $\mathbf{E_2}$**.** Si ocurre una transición atómica entre ellos la radiación emitida tiene una frecuencia $\boldsymbol{v}$, $= \mathbf{h}^{-1} (\mathbf{E_2} — \mathbf{E_1})$, donde h es la constante de Planck. Si ahora nos desplazamos hacia la región del espectro de energías donde la separación entre dos niveles consecutivos es cada vez menor, la radiación que se emite tiene una frecuencia cuyo valor es cada vez más próximo al que se obtiene de las ecuaciones de la electrodinámica clásica al suponer que la trayectoria de una partícula cargada (el electrón) se curva suavemente hacia el interior de su órbita. Con esta idea, Bohr pudo conciliar los complejos problemas que se originaron por el descubrimiento del cuanto de luz y el del núcleo atómico de Rutherford cuando el cuanto de acción de Planck es muy pequeño comparado con la acción que aparece en el sistema por describirse, hay una reconciliación entre la descripción clásica de la naturaleza, que contiene la regla de que la naturaleza no "pega de brincos", con la forma discontinua en que el campo de radiación y un átomo intercambian energía.

Es sin embargo notable que, a pesar de aceptar y usar la teoría de los cuantos, Bohr no podía reconciliarse con el concepto de cuanto de luz de Einstein. Su argumento, e insistía mucho en él, era que la definición de frecuencia de un cuanto de luz que determina su energía, es *per se*, un concepto que se origina en la teoría ondulatoria de la luz. Por otra parte, Einstein pensaba que una teoría correcta de la luz; debería combinar en alguna forma, aspectos corpusculares y ondulatorios de manera que la energía luminosa esté concentrada en regiones pequeñas del espacio. De hecho, Einstein siempre se empeñó en experimentos por medio de los cuales pudiese descubrir desviaciones del principio de superposición, hipótesis central sobre la que descansa toda la teoría ondulatoria.

Los avances más notables a lo largo de la dilucidación de estas dificultades tuvieron lugar entre los años de 1924 y 1926 en el Instituto que Bohr dirigía en Copenhague (ahora Instituto Niels Bohr) y en los cuales tuvo el papel central, no sólo como actor sino como promotor de las acciones. En los años de 1924-1925,

Werner Heisenberg, visitante regular del Instituto, tuvo la idea de formular rigurosamente las leyes de la mecánica cuántica consistentemente con el principio de correspondencia. Usando una teoría de H. Kramers, también colaborador de Bohr, acerca de la dispersión de la luz, encontró una forma adecuada de transcribir la mecánica, en el sentido cuántico, por medio de las cantidades que describen la transición de un estado a otro, así como la dispersión de luz por un átomo. Por medio de una regla, formulada con dichas cantidades, obtenía las combinaciones entre éstas, cuya base estaba en dar la relación fundamental que determina las frecuencias de la luz emitidas en la transición, en términos de las diferencias entre las energías de los estados en cuestión. Este enfoque condujo a la formulación de la teoría cuántica por M. Born, P. Jordan y el propio Heisenberg y casi simultánea, pero independientemente, por P.A.M. Dirac. Usando dicho método algebraico, el átomo de hidrógeno fue bellamente resuelto por Pauli en 1925 y él mismo hizo notar que todavía esa formulación carecía de un aspecto dinámico que permitiera estudiar el movimiento de una partícula en el espacio y en el tiempo. Mucho menos, era compatible con la teoría de la relatividad especial.

En esos mismos años, 1924-1926, se produjeron otros sucesos que ocasionaron mayor confusión en esta naciente mecánica. Basándose en el dualismo onda partícula, introducido por L. de Broglie en 1924 por medio del cual a toda partícula moviéndose con ímpetu $\mathbf{p = mv}$ se le asocia una onda cuya longitud λ está dada por $\mathbf{p\lambda = h}$. Schroedinger desarrolló la llamada mecánica ondulatoria. Esta propuesta desemboca en una ecuación en derivadas parciales para una función probabilística llamada la función de ondas cuyas soluciones estacionarias permiten resolver una multitud de problemas asociados con sistemas cuánticos. En 1926, Pauli muestra la relación matemática entre la versión de Heisenberg y la de Schröedinger, y en el mismo año este último muestra que ambas teorías son completamente equivalentes. Posteriormente Dirac y Jordan dan unificación matemática al contenido físico de estas teorías y aflora de manera singular la pregunta crucial: La vieja paradoja cuántica que considera la relación entre ondas y partículas, no se confina a la luz misma; es ahora extensiva a las partículas materiales. Aquí reaparece el genio y la intuición de Bohr, quien ahora se concentra en buscar la interpretación física de esta situación.

La evolución de los hechos subsecuentes es sorprendente y amena. En julio de 1926, durante una visita a Münich, Heisenberg asistió a un seminario de Schröedinger sobre la interpretación física de la mecánica ondulatoria, objetando fuertemente la tesis de Scbröedinger sobre la base de que ni siquiera la ecuación de Planck para la radiación del cuerpo negro podría obtenerse de ella. W. Wien, quien ocupaba la cátedra de física experimental de la Universidad de Münich insistió, autoritariamente, que se debía poner un "hasta aquí" a todo eso de los brincos cuánticos y el misticismo atómico. En septiembre de ese mismo año, Schröedinger visitó a Bohr en Copenhague y ante el acoso de este último confesó que su interpretación era vaga, no explicaba la ley de Planck y así, cada vez que Schröedinger admitía una falla, Bohr lo llevaba por cada punto obscuro mediante discusiones un tanto laboriosas. Schröedinger enfermó, y como huésped de Bohr, cayó en cama en casa de éste. Tanto lo atosigó Bohr, que en el colmo de la desesperación, un día gritó:

"¡Si, debemos continuar con estos malditos brincos cuánticos, lamento haber empezado a trabajar en la teoría atómica!" A ello Bohr suavemente le respondió: "Pero nosotros te lo agradecemos mucho pues has permitido que la física atómica haya dado un paso substancial hacia adelante." Aun cuando Schröedinger dejó Copenhague desanimado, Bohr había extraído de estas discusiones las ideas que le permitirían llegar a entender completamente la mecánica cuántica.

Esta anécdota sirve de preámbulo para mostrar el problema central de la mecánica cuántica, sobre el cual Bohr y su grupo se concentrarían en el futuro: la aplicación de un formalismo matemático a cada problema individual y cómo pueden aclararse las paradojas que surgen de la contradicción aparente entre los modelos ondulatorio y corpuscular. En particular, respecto a la interpretación física de la mecánica cuántica, Heisenberg y Bohr, los dos exponentes más brillantes y profundos del grupo, tomaron derroteros diferentes. El primero nunca aceptó a la versión ondulatoria de Schröedinger como parte integral de una teoría cuántica. Partiendo del formalismo matemático generado por él, Born y Jordan intentaban interpretar físicamente las situaciones experimentales más simples, *e.g.*, la huella que deja un electrón en una cámara de nubes. En la mecánica cuántica se había comenzado por suponer que tales huellas no

existen, en tanto que en la mecánica ondulatoria era difícil interpretar cómo un fenómeno ondulatorio localizado, algo así como un paquete de ondas, no se dispersaba de nuevo después de un tiempo muy corto.

De acuerdo con la teoría de las transformaciones iniciada por Born y Jordan y desarrollada en toda su amplitud por Jordan y Dirac, se llegó a la conclusión de que la estructura formal de la mecánica cuántica se había integrado, no había nada más que cambiar y de nuevo lo que faltaba era una interpretación clara del experimento en términos matemáticos, libre de contradicciones. La solución llegó durante una noche de insomnio de febrero de 1927 cuando, en palabras del propio Heisenberg, paseando por el parque Faelledpark, en una noche limpia y clara, de cielo estrellado, para respirar un poco de aire fresco antes de dormir, se le ocurrió la idea "obvia" de que debería postularse que la naturaleza sólo permitiría aquellas situaciones experimentales que pudiesen describirse con el formalismo de la mecánica cuántica. Esto implicaría, como se deduce del formalismo matemático, que si A y B son dos variables que no conmutan entre sí, no pueden medirse simultáneamente. ¡La posición y el ímpetu de una partícula no son simultáneamente mensurables! Esto condujo a Heisenberg a formular su famoso *principio de incertidumbre*: la imprecisión en la medición de **A**, Δ**A** multiplicada por la imprecisión en la medición simultánea de **B,** Δ**B**, de dos tales variables A y Bes necesariamente mayor que h/4p

$$\Delta \mathbf{A}\ \Delta \mathbf{B} \geq \mathbf{h/4\pi}$$

Bohr se encontraba en Noruega de vacaciones, lo cual permitió a Heisenberg madurar bien sus ideas, escribirlas, discutirlas con Pauli, quien las aceptó y estimuló de inmediato, y tener lista una primera versión de un escrito para presentárselo a Bohr a su regreso.

Aquí es importante mencionar que Bohr había tomado un sendero opuesto al de Heisenberg aceptando como parte de la interpretación física el aspecto ondulatorio de la mecánica cuántica propuesto por Schröedinger. Ya en 1924 Bohr, Kramers y Slater habían publicado un trabajo en el cual intentaron tomar la dualidad onda-partícula, esto es, modelos corpusculares y ondulatorios como punto de partida para interpretar físicamente a los fenómenos cuánticos. Las ondas deberían explicarse como un campo de probabilidad aunque esto implicara renunciar a la conservación de la energía en los procesos individuales. Por otra parre, W. Bothe y H. Geiger habían demostrado, experimentalmente, la validez de la conservación de la energía en tales procesos. No obstante esta contradicción, Bohr seguía pensando que el dualismo aparente era un fenómeno tan medular que debería ser el punto de partida natural de cualquier interpretación física. Lo primero que Bohr argüía era el significado mismo de lo que conceptual y prácticamente se entiende por una medición "óptima" *i.e.*, la medición de la posición y el ímpetu de un electrón. Por ejemplo, en el efecto Compton, la dispersión de fotones (cuantos de luz) por electrones, mostró que la falta de definición en el ímpetu de un electrón no está directamente relacionada con el cambio producido por el choque con un fotón sino que surge de la incertidumbre asociada con la determinación del choque mismo en un dispositivo que vaya a utilizarse para medir la posición precisa del electrón. Así llegó a establecer mediante muchos ejemplos, en los cuales el concepto ondulatorio apareció como herramienta natural, que las relaciones de incertidumbre surgen de la relación entre la descripción espacio temporal y la conservación ímpetu-energía en procesos atómicos.

Cuando Bohr vio el trabajo elegante y formal de Heisenberg expresó no sólo cierto escepticismo sino, descontento. Su objección fundamental fue que Heisenberg no introducía el dualismo entre ondas y partículas. Después de varias semanas de discusiones, algunas arduas y tensas y con la participación decisiva de Oskar Klein, llegaron finalmente a la conclusión de que en realidad ambas posturas son completamente equivalentes y que las relaciones de incertidumbre son un caso particular de una dualidad onda-partícula, ahora conocida como el *principio de complementariedad*. Veamos esta idea con un poco más de cuidado ya que, para muchos, expresa otra contribución fundamental de Bohr al entendimiento de la mecánica cuántica. Para Bohr, los conceptos mismos de la física clásica son indispensables en la descripción de sistemas cuánticos, conceptos como posición, ímpetu, tiempo y energía. De este modo, para extraer conclusiones precisas de mediciones experimentales se requiere que los experimentos mismos sean descriptibles por medio de la física clásica, esto es, en cuanto concierne a los dispositivos de medición, los

efectos conectados con la constante h son o pueden ser despreciados. La existencia de un cuanto de acción finito significa que sólo en casos especiales es posible conciliar diferentes dispositivos experimentales en el sentido de que las conclusiones extraídas de una medición con un dispositivo pueden utilizarse conjuntamente con las extraídas de una segunda medición con otro dispositivo. A esta relación la llamó complementariedad. Si mediante un dispositivo experimental se quiere hacer una determinación precisa de un aspecto corpuscular, es imposible, a partir de una medición simultánea con el mismo dispositivo, extraer un conocimiento preciso de un aspecto ondulatorio. Este principio está íntimamente relacionado con el carácter de la descripción mecánico cuántica de la naturaleza lo cual implica que ciertos conceptos, indispensables para una descripción completa, son en cierto sentido contradictorios entre sí y la complementariedad expresa este tipo peculiar de contradicción. Esta postura resume lo que hoy en día se conoce como la interpretación de la Escuela de Copenhague de la mecánica cuántica.

En el otoño de 1927 tuvo lugar el Congreso Solvay en Bruselas sobre el tema Electrones y Fotones, que cerró este maravilloso periodo de la historia de la teoría atómica. En un círculo integrado por personalidades como Planck, Einstein, Lorentz, Bohr, De Broglie, Schröedinger, Born, Heisenberg, Kramers, Pauli, Dirac y otros, las discusiones rápidamente se enfocan hacia el famoso duelo entre Bohr y Einstein sobre el grado en que la teoría atómica, en su concepción presente, podría considerarse como la solución final de las dificultades que se habían discutido a lo largo de varias décadas.

Para los seguidores de la Escuela de Copenhague la respuesta fue y sigue siendo afirmativa. Einstein nunca la aceptó y aunque ideó numerosos ejemplos, pensados para rebatir la postura de Bohr, uno a uno éstos eran explicados por Bohr y seguidores. En una ocasión Ehrenfest le dijo a Einstein: estoy avergonzado de ti Einstein. Te has puesto aquí en la misma posición que tus oponentes en sus vanos intentos de refutar tu teoría de la relatividad. Estas discusiones todavía continuaron en 1930, en el siguiente Congreso Solvay, y para los oponentes de Bohr, todavía subsisten cincuenta años después. ¿Constituye la mecánica cuántica una teoría completa para la descripción de los fenómenos atómicos y subatómicos? Veamos, en los diálogos subsecuentes lo que opinan otros autores.

Indice | Siguiente

DIÁLOGO ENTRE PIER A. MELLO, OCTAVIO OBREGÓN Y LEOPOLDO GARCÍA-COLÍN

OCTAVIO OBREGÓN.—Respecto a este asunto de la complementariedad que se acaba de mencionar estaba leyendo en una biografía de Bohr cuál fue su actitud, y la de Heisenberg, frente a estos primeros descubrimientos de la falta de causalidad en los procesos atómicos y la imposibilidad de medir simultáneamente observables físicas, cuyos correspondientes operadores matemáticos no conmutan. Se describe la desesperación de Heisenberg que afligía a Bohr. Para tratar de calmar un poco la desesperación de su amigo, como acaba de mencionar Leopoldo, Niels Bohr partió a esquiar a Noruega por unas semanas y en este ambiente se le ocurrió la idea de la complementariedad, que después fue desarrollando y perfeccionando en el curso de los años.

De hecho, la idea fundamental de Bohr, con respecto a esta visión del problema, nació precisamente de la dificultad de compaginar la medición simultánea de dos variables que no conmutan. En vez de considerar esto realmente como una fuente de desesperación y como una limitación parece que le dio la vuelta diciendo que, de hecho, la naturaleza es así, que nos muestra aspectos complementarios. Después insistió mucho, en el curso de los años, acerca de cómo realmente se mide una de las variables y cómo se mide la otra. Insistió muchísimo en el hecho de que para medir aquí necesitas un aparato, para medir allá, necesitas otro aparato que, en realidad, es mutuamente excluyente con el primero. Entonces, no hay que persistir en medir uno junto con el otro precisamente porque las dos mediciones son mutuamente excluyentes.

Desde luego, este principio de complementariedad parece tener un papel muy importante en la física y en especial en la mecánica cuántica. Me gustaría que habláramos un poco de la función de onda que habíamos mencionado; es decir, qué relación tiene esta no conmutatividad de dos variables físicas que tenemos que medir independientemente con lo que ya aquí se ha mencionado. Qué es esa ecuación de ondas de Schröedinger y cómo se puede interpretar; entonces aquí te pediría, Pier, que nos dijeras algo sobre la relación del principio de complementariedad y la función de onda.

PIER A. MELLO.—Bohr regresó de sus vacaciones con la idea de la complementariedad y puso en efervescencia al Instituto de Copenhague a través de acaloradas discusiones. Como dato anecdótico, en una ocasión había en la biblioteca del Instituto una gran discusión entre los estudiantes acerca de cómo se podía entender la complementariedad. Con un cierto sentido del humor, Bohr les dijo que es imposible que alguien pueda hacer una reverencia a una persona sin al mismo tiempo darle la espalda a otra: esto es parecido a lo que le pasa al electrón, cuando dos variables no conmutan y por tanto no son medibles al mismo tiempo.

Quisiera mencionar, además, un punto que, para un estudiante que por primera vez se acerca a la mecánica cuántica (MQ) (¡y a veces mucho después también!), es realmente dramático.

Posición y momento "no son medibles simultáneamente", en el sentido de que, para una función de onda dada, las dispersiones de x y p no pueden ser arbitrariamente pequeñas, sino deben satisfacer la desigualdad de Heisenberg. Pero la Escuela de Copenhague va mucho más allá y dice que posición y momento *no están simultáneamente definidos* para la partícula: o sea, el electrón *no posee* una posición y una velocidad al mismo tiempo.

A Einstein le molestó profundamente este punto de vista. Concretamente, tomó el ejemplo del decaimiento de un núcleo radiactivo: un emisor de alfas, por ejemplo. Como Einstein no podía creer que el instante del decaímiento de ese núcleo no estuviera definido, propuso que la función de onda describiera no un sistema, sino un conjunto representativo o *ensemble* de ellos. Entonces el instante de decaímiento estaría perfectamente definido para cada sistema, pero tendría una dispersión sobre los miembros del *ensemble*.

LEOPOLDO GARCÍA-COLÍN.—Un comentario muy breve con respecto al principio de

complementariedad. Yo confieso que cuando estudié mecánica cuántica me pasó un tanto inadvertido. Usualmente en los cursos tradicionales se enseña mucho la herramienta matemática pero todos estos aspectos conceptuales se dan por un hecho; es decir, se da por sentado que son correctos o simplemente no se mencionan. Con respecto al concepto de la complementariedad hay un punto que vale la pena sacar a colación relativo a la función de ondas. De hecho voy a lanzar una duda, que es la siguiente: en conexión con la función de onda, para Bohr era muy claro que dicha función debe describir un campo de probabilidad; sin embargo, muy detrás en su mente por lo que he podido ver, ahora que he tenido que repasar estos conceptos, él tenía también bien arraigado en la mente que la frecuencia que aparece en la fórmula **e = h*v***, la frecuencia de los cuantos de luz es un concepto óptico; sólo se puede definir usando las leyes de la electrodinámica clásica, que están basadas en el principio de superposición; es decir, si no aceptamos el principio de superposición en la teoría de Maxwell, tenemos que hacer una electrodinámica nueva, por lo menos distinta a la que conocemos. De aquí que debe existir una relación un tanto profunda entre el principio de complementariedad y lo que quizá podríamos llamar el principio de superposición que después se usa, claro, en la mecánica cuántica. Octavio comentará algo al respecto.

OBREGÓN.—Si, yo quisiera tomar el punto del principio de superposición y la función de onda y advertir que voy a intentar aquí representar el papel de abogado del diablo con respecto a algunos aspectos de la escuela de Copenhague. Primero, deseo recordar que en una serie de problemas físicos como por ejemplo la descripción de algunos sistemas que se utilizan en estado sólido, los sistemas cuánticos grandes, como los superconductores utilizamos más bien teorías de tipo hidrodinámico para su descripción. A pesar de que entendemos básicamente lo que es una función de Bardeen, Cooper y Schrieffer para la descripción microscópica cuántica del sistema, no trabajamos normalmente con esta última para describir el comportamiento de este tipo de sistemas físicos. Lo anterior no es un problema de principio pero muestra que la función de onda no es el camino más útil para describir al sistema. Así, en esta clase de problemas particulares, al describir al sistema con otros principios físicos y ecuaciones en general no lineales, la pregunta del principio de superposición en la mecánica cuántica fundamental no es relevante.

Por otra parte, y a nivel más fundamental, la función de onda normalmente se escribe como una suma de ciertos coeficientes por otras funciones de onda, es decir, como una superposición de funciones de onda. Poniéndolo de manera más ilustrativa sí u: es nuestra tundan de onda, ésta se puede escribir como

$$\psi = C_1\,\psi_1 + C_2\,\psi_2 + C_3\,\psi_3 + \ldots$$

donde **C1, C2, C3,...** son constantes y $\psi_1, \psi_2, \psi_3, \ldots$ representan las funciones de onda que al superponerse linealmente nos dan y. Los puntos suspensivos nos dicen que las C_i **y** ψ_i son en general mucho más que sólo tres. Ahora, la interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica nos dice que siempre tenemos un observador macroscópico que se comporta clásicamente además del sistema cuántico que queremos estudiar. La función de onda ya no va a consistir en varias funciones de onda sino se va a *colapsar a una sola*. A cuál de los elementos de la superposición se va a reducir eso no lo sabemos. Uno entonces asigna una distribución de probabilidades a los posibles resultados del experimento

$$P_i = |C_i|^2$$

es decir, la probabilidad de que nuestra función de onda se colapse solo a, digamos ψ_3 es $|C3|^2$. Por este motivo el aparato macroscópico de medición no puede decidir qué valor va a encontrar para el sistema observado y se dice que éste entra entonces en un estado de esquizofrenia.

Este colapso y la asignación de pesos estadísticos *no son una consecuencia* de la ecuación de Schröedinger. Provienen de una metafísica externa *a priori* a la que se permite actuar en ese momento y suspender la ecuación de Schröedinger (o reemplazar condiciones a la frontera en su solución por aquellas del vector de estado colapsado). El punto de vista de Copenhague da la impresión de que el colapso de la función de onda y ésta misma están sólo en la mente. Si esto es así, ¿qué sucede con la realidad?; ¿cómo puede uno entender y describir el mundo objetivo que claramente nos rodea? Einstein se opuso hasta su muerte a esta solución metafísica de la escuela de Copenhague. ¿Querrías tú comentar algo al respecto

Pier?

MELLO.—Algunas de estas ideas se pueden ilustrar muy bien con el famoso ejemplo del "gato de Schröedinger". En un cuarto están un gato y una substancia radiactiva; junto a ésta hay un contador Geiger conectado a un martillo que, bajo una descarga del contador, rompe un frasco de veneno y el gato muere. Si al cabo de una hora hay 50% de probabilidad de que uno de los núcleos radiactivos decaiga, ¡la función de onda será una combinación lineal del gato vivo y del gato muerto en iguales proporciones! Esta situación es incomprensible si aplicamos la función de onda a un sistema. Si la aplicamos a un *ensemble*, nos encontraremos vivos al 50% de los gatos y muertos al otro 50% y la situación, cabe decir, tiene perfecto sentido.

OBREGÓN.—Bueno Pier, si uno acepta que la función de onda describe a un *ensemble* y no a un sistema, como tú has mencionado que Einstein lo propone, las cosas mejoran y las $\mathbf{P_i = |Ci|^2}$ que yo he mencionado serían en tu ejemplo del "gato de Schröedinger" solo dos cada una con un valor de 0.5. Sin embargo, en la interpretación tradicional de la Escuela de Copenhague el colapso de la función de onda existe aun para un solo sistema y es una proposición no contenida en la ecuación fundamental de la teoría, la ecuación de Schröedinger. Esta proposición me parece a mí especialmente fuerte y quizá no necesariamente la única alternativa para interpretar la mecánica cuántica. Más adelante mencionaré en especial una propuesta de iriterpretación alterna, aunque existen aún otras más.

Bryce de Witt dice lo siguiente respecto a la creencia que la mayoría de los físicos tenemos de ser fieles seguidores de la Escuela de Copenhague: "Al hablar de los seguidores de esta interpretación es importante distinguir los seguidores activos del resto, y darse cuenta que aun la mayoría de los autores de libros de texto no están incluidos en el primer grupo. Si se hiciera una encuesta entre los físicos, la mayoría profesaría ser miembro del grupo convencionalista, así como la mayoría de los norteamericanos proclamarían su creencia en la declaración de los derechos del hombre, independientemente de que la hayan leído. El gran problema en tratar con los activistas es que ellos también cambian las reglas del juego pero, contrariamente a Wigner o Bohr por ejemplo, pretenden no haberlo hecho."

MELLO.—¿Qué es lo que te molesta particularmente del colapso? ¿Cuál es el punto fundamental que crees que es inconveniente, o inadecuado?

OBREGÓN.—En el contexto de la mecánica cuántica convencional, especialmente acompañando esta idea del *ensemble* que tú mencionaste, las cosas no parecen funcionar mal. Sin embargo, siendo la idea del colapso una proposición más allá de la ecuación básica de la teoría, la ecuación de Schröedinger, podemos preguntarnos qué otras propuestas o interpretaciones podrían ser válidas y adecuadas y acompañar a la ecuación de Schrödinger en una diferente interpretación de la mecánica cuántica. Más tarde me referiré a un sistema, el Universo, para el cual es especialmente conveniente modificar la interpretación usual de la mecánica cuántica.

MELLO.—Un punto que a mí sí me molesta es el siguiente: en la mecánica cuántica convencional se supone que después de una medición el sistema se encuentra en un estado mixto. Este postulado fundamental aparece, por ejemplo, en el libro de Von Neumann, en el capítulo sobre "Procesos de medición". Por otro lado, Wigner demuestra que no es compatible con las ecuaciones de movimiento de la mecánica cuántica suponer que el estado del objeto más aparato es, después de una medición, una mezcla de estados, cada uno con una posición definida de la "aguja" del aparato.

De los dos cambios que puede sufrir la función de onda, el continuo, descrito por la ecuación de Schröedinger, y el discontinuo, producido por un proceso de medición, el segundo no parece estar entendido.

Tal vez el carácter macroscópico del aparato sea esencial para describir este cambio irreversible a un estado mixto, y la situación sea semejante a la que ocurre en la mecánica estadística, cuando se quiere hacer compatible la irreversibilidad macroscópica con la reversibilidad de las leyes de movimiento

microscópicas.

GARCÍA- COLÍN.—Pero ¿qué se insinúa entonces, o que se sugiere de esto?; que si yo mido e interpreto la medición en términos de un ensamble el resultado de la medición va a ser uno distinto a si uso simplemente el principio de superposición en términos del colapso de onda de que estaba hablando Octavio.

MELLO.—La manera como se aplican estas ideas se puede ilustrar, por ejemplo, en el experimento de las dos rendijas. Originalmente la función de onda es la superposición lineal $\psi = \mathbf{a}_1\psi_1 + \mathbf{a}_2\psi_2$ (donde los índices refieren a los dos agujeros) y se observa interferencia en la pantalla. Si se quiere medir porque agujero paso el electrón, el estado se vuelve una *mezcla* de ψ_1 y ψ_2 con probabilidades $|\mathbf{a}_1|^2$, $|\mathbf{a}_2|^2$, y se pierde la interferencia. Este cambio no es descriptible con una dinámica lineal como la mecánica cuántica.

El problema es todavía más desconcertante. Aun si suponemos que la interacción sistema-aparato cambia la función de onda $|\psi_{apar}\rangle\ |\psi_{sist}\rangle$ **en** $|\psi_{apar}\rangle\ |\psi_{sist}\rangle$, la probabilidad de encontrar un hamiltoniano (en el sentido de matrices estocásticas) que haga este cambio es cero.

GARCÍA- COLÍN.—Quizás, Octavio, podrías explicarnos porque consideras que la interpretación usual de la mecánica cuántica no es adecuada en la cosmología cuántica.

OBREGÓN.- SÍ, con gusto. La electrodinámica cuántica, como sabemos, es una teoría importantísima que nos enseña a pensar que la interacción entre dos partículas cargadas no la debemos interpretar sólo como acción a distancia como es el caso de la ley de Coulomb (y de la gravitación universal) sino que la interacción entre dos electrones, que producen el campo, sucede porque intercambian fotones (que transportan el campo) entre ellos. De este tipo de descripción podemos nuevamente en un límite clásico" recuperar, por ejemplo, la ley de Coulomb. Nos gustaría seguir los mismos pasos que hemos aprendido en la electrodinámica para lograr construir una gravitación cuántica. Las masas generarían el campo y los "gravitones" lo transportarían. No hemos logrado, por motivos de principio y técnicos, construir una gravitación cuántica y probablemente la respuesta esté por una parte en una teoría que contenga otros campos (una teoría unificada) y quizá en un entendimiento más profundo, a nivel elemental microscópico, del origen y papel de la gravitación.

Un primer paso para tratar de entender lo que debe ser una gravitación cuántica consiste en estudiar los objetos que la gravitación describe como agujeros negros, o bien el mismo Universo (la teoría de la gravitación describe bien su expansión) y entender qué es y qué significa la función de onda asociada a cada uno de estos objetos.

Si el Universo va a ser nuestro sistema cuántico ¿cuál es el aparato macroscópico clásico que vamos a usar para hacer mediciones, de acuerdo con la mecánica cuántica tradicional? Todos estamos dentro del Universo, nadie está fuera. Tenemos que buscar alternativas a la mecánica cuántica tradicional.

Estas alternativas existen; una de las más sorprendentes se debe a Hugh Everett. Él afirma que se puede construir un esquema en el que:

i) Toma el formalismo matemático de la mecánica cuántica como está sin agregarle nada.

ii) Niega la existencia de un mundo clásico separado.

iii) La función de onda nunca colapsa.

Everett necesita definir lo que llama el estado relativo, es decir, tiene que definir la función de onda como producto de una cierta función del sistema por la correspondiente del aparato y alega que la mecánica cuántica provee su propia interpretación.

De acuerdo con esta interpretación, el Universo está definido por una función de onda similar a la que

introdujimos anteriormente pero de mucho mayor complejidad. El Universo está dividiéndose constantemente en un número enorme de ramas, resultando todas de las interacciones de mediciones entre sus miriadas de componentes. Más aún, toda transición cuántica que ocurre en cada estrella, en cada galaxia, en cada esquina remota del Universo está dividiendo nuestro mundo local en la Tierra en millones de miriadas de copias de él.

Por fabuloso que lo anterior parezca, el formalismo de esta teoría ha sido tomado en serio por un grupo considerable de físicos prestigiados. Esta propuesta no sólo vale para el Universo sino para cualquier sistema cuántico incluyendo el aparato de medición.

Antes de pasar el micrófono a Pier quisiera insistir en que existen otras alternativas que no describí aquí. Sin dar ningún detalle por falta de tiempo, puedo mencionar que el profesor Beil, autor de la famosa desigualdad de Bell, ha inventado un esquema alterno a la mecánica cuántica llamado la onda piloto.

MELLO.—Sólo quiero mencionar una anécdota. Hace diez o doce años apareció en *Physics Today* un artículo de DeWitt sobre el rompimiento en varios universos que mencionas. Al mes siguiente un lector, en carta al director, invita a los defensores de esa teoría a no preocuparse si algún día tuvieran un accidente de avión al regresar a su casa, ¡ya que en algún otro universo estarían perfectamente a salvo!

A parte la broma anterior, ¿tú crees que tenga sentido la afirmación de que la mecánica cuántica contiene su propia interpretación? Yo no entiendo cómo una teoría pueda interpretarse a sí misma.

OBREGÓN.—Se asegura sólo que la interpretación probabilística convencional de la mecánica cuántica emerge del formalismo mismo. No tiene implicaciones filosóficas más allá de esta última afirmación.

MELLO.—Otra alternativa para tratar este problema, y que entiendo aún menos, es la propuesta de Wigner de que la interacción entre la mente de un ser viviente y la naturaleza inanimada podría ser la responsable del colapso de la función de onda.

GARCÍA-COLÍN.—Quisiera hacer un comentario, volviendo a lo que dijo Octavio, no en cuestión de la gravitación, sino desde el punto de vista de las variables ocultas. Es bien sabido que el primero quizás, y si no el primero el opositor más consistente de Bohr fue Einstein. Él nunca creyó en esta interpretación, esta incurabilidad de la amibiasis a que nos hemos referido antes. Con base en la llamada paradoja de Einstein, Podolsky y Rosen, se ven claramente los argumentos que daba Einstein intentando buscar una violación del principio de superposición. Con base en dichos argumentos se cuestiona seriamente no sólo si la mecánica cuántica constituye una teoría completa, sino también la postura de la interpretación probabilística de Bohr y Heisenberg. Esta paradoja, de la cual creo debemos hablar más, desató una serie de posturas diferentes con respecto a la interpretación de la mecánica cuántica, al grado que aún en la actualidad éste es un problema vivo. En efecto, han pasado ya cincuenta años desde que se publicó el trabajo de Einstein, Podolsky y Rosen y todavía seguimos discutiendo cuál es la forma de interpretar la mecánica cuántica. Veamos entonces qué opiniones existen al respecto.

OBREGÓN.—Me gustaría decir, en breves palabras, cómo entiendo las ideas de Einstein, Podolsky y Rosen (EPR). EPR proponen tres postulados que suponen que toda teoría física razonable debe cumplir:

i) La regularidad en las observaciones de los fenómenos es producida por realidades físicas cuya existencia es independiente del observador humano. A este postulado se le llama realismo.

ii) El procedimiento inductivo es válido y puede ser aplicado sin limitaciones. De un número grande y finito de observaciones puede uno concluir reglas (o leyes) que valgan en general.

iii)Se conoce como la separabilidad o localidad de Einstein y se refiere a eventos que han acontecido en diferentes lugares, y dice que cada interacción entre estos eventos a lo más será transmitida con la velocidad de la luz.

Estos tres postulados parecen tan evidentes y naturales que todo científico los aceptaría sin necesidad, casi, de reflexionar. Sin embargo, basados en ellos empezaremos suponiendo que podemos medir dos componentes de *spin* de un protón de manera independiente. Esta suposición es contraria a la evidencia, pero simplifica la presentación de la prueba (que puede ser hecha en forma rigurosa). Supongamos que un aparato de medición registra para un protón las componentes de *spin* $\mathbf{X^+}$ **y** $\mathbf{Y^-}$. La tercera componente, **Z**, puede tener sólo el valor más o menos, esto quiere decir que, la descripción completa del *spin* del protón seria $\mathbf{X^+Y^-Z^+}$ **o** $\mathbf{X^+Y^-Z^-}$. Si encuentra uno varios protones con los componentes de spin $\mathbf{X^+Y^-}$ podemos escribir para el total

$$\mathbf{N(X^+Y^-) = N(X^+Y^-Z^+) + N(X^+Y^-Z^-)}$$

El símbolo $\mathbf{N(X^+Y^-)}$ designa el número de protones con la componente de *spin* $\mathbf{X^+}$ **y** $\mathbf{Y^-}$.

Como el orden aquí no tiene importancia podemos por el mismo argumento anterior escribir

$$\mathbf{N(X^+Z^-) = N(X^+Y^-Z^+) + N(X^+Y^-Z^-)}$$

Por lo tanto

$$\mathbf{N(X^+Z^-) \geq N(X^+Y^+Z^-)}$$

$$\mathbf{N(X^+Z^-) \geq N(X^+Y^-Z^-)}$$

el símbolo≥ significa mayor o igual.

De la misma manera

$$\mathbf{N(Y^-Z^+) = N(X^+Y^-Z^+) + N(X^-Y^-Z^+)}$$

y por consecuencia

$$\mathbf{N(Y^-Z^+) \geq N(X^+Y^-Z^+)}$$

Nuevamente

$$\mathbf{N(X^+Y^-) = N(X^+Y^-Z^+) + N(X^+Y^-Z^-)}$$

Hemos mostrado que $N(Y^-Z^+)$ es mayor o cuando menos igual a $\mathbf{N(X^+Y^-Z^+)}$ y que $\mathbf{N(X^+Z^-)}$ es mayor o igual a $\mathbf{N(X^+Y^-Z^-)}$.

La suma

$$\mathbf{N(X^+Y^-Z^+) + N(X^+Y^-Z^-)}$$

es por lo tanto menor o igual a la suma

$$\mathbf{N(Y^-Z^+) + N(X^+Z^-)}$$

y por lo tanto vale la desigualdad

$$\mathbf{N(X^+Y^-) \leq N(X^+Z^-) + N(Y^-Z^+)}$$

Ésta es la llamada desigualdad de Bel que se deduce de los postulados de EPR. De las reglas de la

mecánica cuántica se sigue que uno puede elegir los ejes X, Y y Z de tal forma que la desigualdad de Bell no sea válida.

Con base en lo anterior, se han diseñado varios experimentos para investigar si la desigualdad de Bell se cumple o no. Hasta ahora parece que de los primeros siete experimentos, cinco están de acuerdo con la mecánica cuántica y dos con la desigualdad de Bell aunque todavía en particular en estos últimos las barras de error son muy grandes y no se puede decir nada concluyente. Pido a Pier que amplíe este importante punto de las variables ocultas y de la propuesta de Einstein, Podolsky y Rosen.

MELLO.—EI título del artículo de Einstein, Podolsky y Rosen (EPR) es "¿Se puede considerar completa la descripción mecánico-cuántica de la realidad física?". Pocos meses después, Niels Bohr contestó a las objeciones de este trabajo con otra publicación que lleva precisamente el mismo título.

Quisiera resumir el problema EPR en dos ideas fundamentales. La primera, la de completez de la mecánica cuántica (MC), es la conclusión directa del artículo. La segunda la de los aspectos no locales de la MC, no es, para mí, tan directamente transparente del artículo mismo, sino más bien fruto de estudios posteriores.

Completez. EPR dan un criterio de realidad física: "Si se puede predecir con certeza, sin perturbar al sistema, el valor de una cierta variable física, ésta es un elemento de la realidad física." Presentan después un argumento asociado con la medición de posición y momento. Es un poco más simple repetir el argumento en términos de variables de *spin*. Pensemos en una pareja de partículas con $\mathbf{s^{(i)}=1/2\ (i=1, 2)}$, preparada con *spin* total cero. La pareja se desintegra, sus dos componentes se separan y, cuando están muy lejos una de otra (para evitar cualquier interacción entre ellas), se mide $\mathbf{s^{(i)}_z}$; el resultado de la medición permite predecir con certeza, y sin interactuar con la partícula 2, que $\mathbf{s^{(2)}_z = s^{(1)}_z}$. Por tanto, $\mathbf{s_z}$ es un elemento de la realidad física. Se puede presentar un argumento semejante para $\mathbf{s_x}$, de lo que se concluye que $\mathbf{s_z}$ y $\mathbf{s_x}$ son elementos de la realidad. Pero la MC especifica, a través de sus funciones de onda, una o la otra de esas dos cantidades; por lo tanto, la MC sólo nos da una descripción incompleta de la naturaleza.

Bohr replicó diciendo que lo se puede separar, en el argumento, al sistema del aparato de medición, y se necesitan aparatos mutuamente excluyentes para medir $\mathbf{s_z}$ o $\mathbf{s_x}$.

No localidad. Supongamos, como en la interpretación copenhaguense, que los observables asociados a dos operadores que no conmuten no estén simultáneamente definidos: es sólo en el momento de la medición que el sistema toma la decisión de exhibirnos $\mathbf{s_x}$, o $\mathbf{s_y}$, o $\mathbf{s_z}$. Entonces encontramos una situación curiosa como la siguiente. Las partículas 1 y 2 ya están muy lejos. Si mido $\mathbf{s^{(1)}_z}$ y encuentro + 1/2, al medir $\mathbf{s^{(2)}_z}$ encontraré necesariamente - 1/2. Pero si mido $\mathbf{s^{(2)}_z}$ y encuentro + 1/2, al medir $\mathbf{s^{(2)}_z}$ encontraré a veces + 1/2, a veces - 1/2. Esto es precisamente lo que pasaría en las partículas clásicas cuyo momento angular tuviera valores definidos en las tres direcciones. La correlación observada sería una consecuencia de la conservación del momento angular. Pero si un valor específico de una cierta proyección del *spin* ocurre sólo en el momento de medir, ¿cómo sabe la partícula 2 a qué *ensemble* debe pertenecer? ¿De qué manera pudo 1 comunicarle a 2 qué decisión tomar?

Un tipo de variables ocultas que se han inventado cumple precisamente con la tarea de evitar esa no-localidad, produciendo la correlación adecuada entre las variables a nivel cuántico.

GARCÍA-COLÍN.—¿Qué nos podrías decir sobre algún experimento reciente realizado para aclarar algunas de estas cuestiones?

MELLO.—En un número reciente de *Physics Today*, Mermim comenta los resultados de un experimento realizado en Orsay. Quisiera resumir algunas de las ideas presentadas en ese artículo.

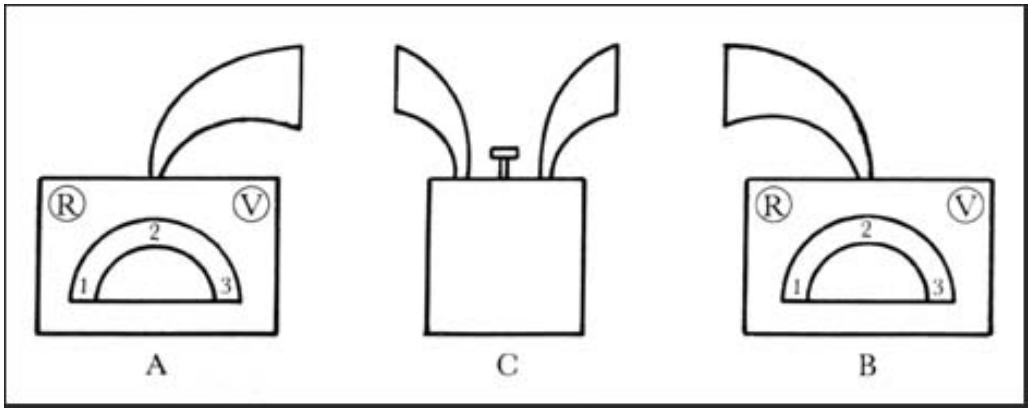


Figura 4.

Un aparato EPR se puede esquematizar de la siguiente manera. A y B representan dos detectores: cada uno tiene un switch que se puede colocar en tres posiciones diferentes (que van a corresponder a las tres proyecciones del *spin*, aunque A y B se pueden seguir considerando como cajas negras) y dos focos, uno rojo y uno verde (que van a corresponder a si se observa + 1/20 - 1/2 para un detector, y al revés para el otro). En medio está una fuente C, que se dispara apretando el botón que está sobre ella. Se varían al azar las posiciones de los switches cada vez que se dispara la fuente y se observa cuál foco (R o V) se prende en cada detector. Un fragmento típico de una corrida muy larga se ilustra a continuación:

31 RR	**22 VV**	**33 VV**
33 VV	**11 RR**	**21 VR**
33 RR	**33 VV**	**13 VR**
12 VR	**31 VR**	**23 VR**

Se observa que **R** y **V** ocurren enteramente al azar. Por ejemplo, *la mitad de las veces los dos focos son del mismo color*.

Sin embargo, si aislamos en el listado anterior aquellas mediciones en que el switch está en la misma posición en los dos detectores, se observa que en cada caso se prendió un foco del mismo color (en la aplicación, esto va a corresponder a que los dos *spines* son necesariamente opuestos). Si seguimos considerando al sistema como un conjunto de cajas negras, nos preguntamos qué mecanismo podría causar la correlación de colores que se menciona. Si los dos detectores no se comunicaron entre sí, las dos partículas tuvieron que haber traído desde la fuente un "manual de instrucciones". Supongamos que la "instrucción" haya sido **RVR**, lo que significa que si el switch está en la posición 1, se prende el foco rojo, en la 2 el verde y en la 3 el rojo (en la aplicación, las dos partículas tienen las 3 proyecciones del spin bien definidas: ↑↓↑ y ↓↑↓, respectivamente). Esto explica la correlación mencionada arriba, En total, 5 veces de 9(11, 22, 33, 13, 31) se observa el mismo color. Haciendo el mismo razonamiento para otras instrucciones, se llega a la conclusión de que la fracción de veces que debería observarse el mismo color es mayor que 1/2, ¡mientras que experimentalmente es 1/2! Este es un ejemplo elemental de la desigualdad de Bell que Octavio mencionó antes.

Este resultado me parece muy molesto, porque el haber abierto la posibilidad de que $\mathbf{s}_x$, $\mathbf{s}_y$, $\mathbf{s}_z$ existan al mismo tiempo nos lleva a un resultado que contradice el experimento (cuyas barras de error, por ejemplo, habría que analizar con cuidado) y éste, a su vez, coincide con las predicciones de la mecánica cuántica.

Se podría objetar que querer que $\mathbf{s}_x$, $\mathbf{s}_y$, $\mathbf{s}_z$ existan al mismo tiempo es una extensión inadecuada de los

conceptos clásicos, ya que el *spin*, con su propiedad de que cada proyección solo valga + 1/2 o -1/2 y su magnitud valga 1/2, ¡no es un momento angular clásico! Sería interesante ver si con las variables **x, p**, por ejemplo, el experimento otra vez viola la desigualdad de Bell y sigue la MC.

Feynman, en su librito *The Character of the Physical Law*, expresa su creencia de que no es posible la existencia simultánea de dos variables cuyos operadores no conmuten. Ilustra esto con el experimento de las dos rendijas y parece llegar a la conclusión de que el simple hecho de que el electrón trajera instrucciones desde la fuente acerca de que rendija escoger, ¡destruiría la interferencia en la pantalla!

GARCÍA-COLÍN.—Ha habido críticas a la desigualdad de Bell. ¿Podrías mencionar alguna?

MELLO.—Se ha mencionado que en la demostración de la desigualdad de Bell implícitamente se supone la localidad de las variables ocultas, y que queda abierta la posibilidad de la no localidad. También se ha alegado que la densidad de probabilidad que se usa para las variables ocultas se toma de estado inicial del sistema y el proceso de medición no parece entrar en juego en la prueba.

GARCÍA-COLÍN.—Respecto a este problema de las variables ocultas, ¿tienes algún comentario?

MELLO.—Quisiera comentar sobre una opinión que a veces se escucha, en el sentido de que con la introducción de las variables ocultas no se ha eliminado el azar, sino que éste se ha pasado a otro nivel.

A mí me parece que ese no es el punto. Si se logra introducir variables ocultas λ, se habrá logrado que **x, p** estén *definidas simultáneamente* a un nivel subcuántico; un promedio sobre λ reproduciría la **MC** o alguna generalización de ella, tal como en mecánica estadística se obtiene la termodinámica promediando sobre las variables microscópicas, que estarían "ocultas" a nivel macroscópico. Desde luego habría que ver si las predicciones resultantes concuerdan con el experimento, como mencioné más arriba en conexión con el experimento de Orsay.

La idea de trabajar en el espacio fase, como se hace en física clásica, es muy atractiva. Ha habido más de un intento en el pasado. Sin embargo, un teorema debido a Wigner, que indica que no se puede construir dentro de la MC una densidad de probabilidad positiva definida sobre el espacio fase (por ejemplo, la "distribución de Wigner"), parece limitar esta posibilidad. Pero Wigner supone, en su prueba, que tal densidad es una función cuadrática de la función de onda; esta suposición se puede relajar y así se abre la puerta a una serie de posibilidades muy interesantes.

Finalmente quisiera mencionar el siguiente punto. Aun en mecánica clásica, los sistemas no integrales son deterministas, mas no calculables: parece que sólo se puede dar una descripción probabilística en el espacio fase (sistemas caóticos). Si ahora pensamos en el punto de vista de la electrodinámica estocástica para describir a los sistemas microscópicos, un electrón estaría sujeto a un potencial estocástico proveniente, quizá, del resto de materia en el Universo: seguramente un problema tan complejo como éste cae dentro de la categoría de los no integrables mencionados más arriba, donde sólo es factible dar una descripción probabilística del problema. ¡Tal vez no logremos librarnos del azar!

EPÍLOGO

LEOPOLDO GARCÍA-COLÍN

EPILOGAR una obra es recapitularla. Para ello es obviamente necesario disponer de la obra completa. En el caso de la obra de Niels Bohr esto es poco factible dadas las limitaciones de espacio y otras circunstancias. La idea central detrás de este libro, destinado a homenajear al distinguido científico danés, fue la de resaltar y divulgar algunas de sus contribuciones más notables a la física. Pero no sólo hizo contribuciones notables en esta ciencia sino que desempeñó un papel central en los problemas humanos de las actividades científicas y en el impacto mismo de la ciencia en la política y en la sociedad.

Como físico, fue el autor de varias ideas revolucionarias, desde la introducción de su modelo para el átomo que permitió comprender la tabla periódica de los elementos; tuvo un papel motor en el desarrollo de las ideas sobre la conceptualización de la mecánica cuántica y, posteriormente, intervino en el problema de las fluctuaciones del campo electromagnético y en los primeros modelos del núcleo atómico. Su trabajo es de una profundidad y un alcance tales que todavía hoy en día hablamos y discutimos sobre él con mucha frecuencia. Junto con Einstein, puede considerársele uno de los que más han influido en el desarrollo del pensamiento científico de este siglo.

Como hombre de ciencia, consciente de los alcances de las investigaciones sobre la reacción nuclear y la estructura nuclear, que tuvieron una influencia decisiva en el desarrollo de la energía nuclear, afrontó una situación en la que la física y las relaciones humanas entran en conflicto. Colaboró en la creación de la bomba atómica y, conocedor de su poder demoledor, se constituyó en brillante defensor de la no proliferación de armas nucleares entre las naciones poderosas del orbe. En junio de 1950 dirigió una carta abierta a las Naciones Unidas haciendo un llamado a este respecto. Uno de sus párrafos es elocuente:

En los últimos años, los acontecimientos políticos mundiales han aumentado la tensión entre las naciones y, simultáneamente, las perspectivas de que las naciones grandes puedan competir con la posesión de medios para aniquilar grandes sectores de población y aun convertir considerables porciones de la Tierra en zonas temporalmente inhabitables, han provocado alarma y confusión generalizadas. Como difícilmente puede surgir la cuestión de que la humanidad renuncie al prospecto de mejorar las condiciones materiales de vida a través de las fuentes de energía atómica, un ajuste internacional radical de las relaciones internacionales es, evidentemente, indispensable si la civilización debe sobrevivir.

En su homenaje a Bohr, Weisskopf afirma que con su muerte se terminó una era, la era de los grandes hombres que crearon la ciencia moderna. Hay más que esto. Leyendo los múltiples escritos de aquellos que colaboraron con Bohr y del propio Bohr, se percibe con claridad que toda una escala de valores se ha perdido. La ciencia se hacía en aquella época mañana tarde y noche, entre seminarios, discusiones, almuerzos, paseos en bicicleta, excursiones a pie y otros pasatiempos. En estos últimos participaban no sólo los científicos sino sus esposas, familiares y, a menudo, amigos especialistas en otros campos del saber. Bohr y su esposa Margarita atendían cordialmente a sus huéspedes en su casa, situada junto al propio Instituto. A menudo, a la mitad de una discusión Bohr de repente salía un momento con algún pretexto para atender un asunto administrativo pero decían sus amigos, iba a ver a Margarita con objeto de obtener de ella el apoyo y la inspiración necesarias para continuar con su trabajo. Las actividades creativas se concebían, pues, como parte integral de una cultura y de una sociedad. En ésta, la época de oro de la ciencia, muchos países atravesaron por graves crisis económicas, Alemania por ejemplo, y sin embargo fueron el centro de nucleación, y los grandes motores de la ciencia moderna. En ellos florecieron varios Institutos y Universidades de primerísima calidad, y científicos como los Bohr, Heisenberg, Dirac, Einstein, etc., a la sombra de sus gobiernos y de fundaciones como la Carlsberg y otras. Nunca encuentra uno en los escritos de los historiadores de la ciencia de ese entonces menciones a los problemas derivados de la burocracia administrativa, los bajos tabuladores, los SNI, CONACYT y decenas de siglos más, los

controles de asistencia, la ciencia para el pueblo, y otros tantos factores que agobian a la comunidad científica contemporánea, sobre todo en países como el nuestro.

La realidad es que la ciencia era una actitud hacia la vida, estimulada y protegida por la propia sociedad. La época de oro terminó cuando se convirtió en una forma de ganarse la vida. ¡Y los valores cambiaron!

Niels Bohr a los 4 años (derecha), con su hermano Harald (en brazos de su madre y su hermana Jenny)

Margrethe Norlund y Niels Bohr al anunciar su compromiso (1911)

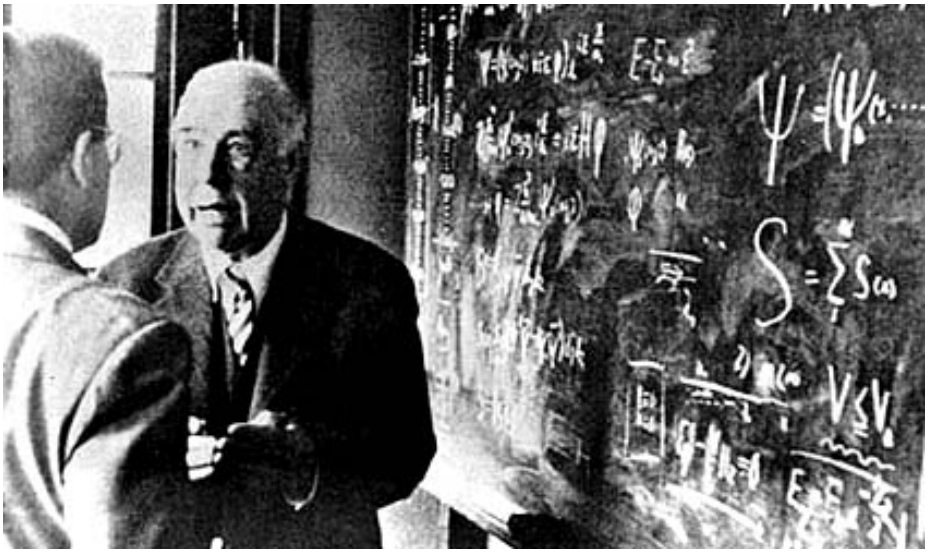
El matrimonio Bohr cincuenta años más tarde

De izquierda a derecha Bohr, James Frank y H.M. Hansen en los años veinte

Una nueva generación de Bohrs durante un paseo con su padre

Al frente de esta foto y de izquierda a derecha, tres de los más notables físicos nucleares de nuestro siglo:

Enrico Ferni, Werner Heisemberg y Bohr



Las ecuaciones del pizarrón requieren de una explicación que Bohr ofrece con vehemencia.

Bohr enciende su sempiterna pipa.

Niels Bohr y su escudo (1885-1962)

Indice

Siguiente

BIBLIOGRAFÍA

S. Rozental (compilador), *Niels Bohr, His Life and Work as Seen by his Colleagues*, Interscience Publ, Co., Nueva York, 1967.

P. Schilpp (compilador), *Albert Einstein; Philosopher and Scientist*, Tudor Publishing Co., Nueva York, 2 ed., 1915 (en especial el artículo de Bohr, PP. 199-242.

"Niels Bohr Centennial" en *Physics Today*, octubre 1985, Vol. 38, Núm. 10 (ver el artículo de Heilbron en la p. 28).

M. Jammer, *The Conceptual Development of Quantum Mechanies*, McGraw-Hill Co., Nueva York, 1966, Cap. 7.

M. Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, John Wiley & Sons, Co., Nueva York, 1974

Indice

Siguiente

COLOFÓN

Este libro se terminó de imprimir y encuadernar en el mes de octubre de 1997 en los talleres de Impresora y Encuadernadora Progreso, S. A. de C. V. (IEPSA), calzada de San Lorenzo 244, 09830 México, D. F.

Se tiraron 3 000 ejemplares

La ciencia para Todos es una colección coordinada editorialmente por *Marco Antonio Pulido*, y *María del Carmen Farías*

Indice

Siguiente

CONTRAPORTADA

Varios científicos mexicanos contribuyen en la presente obra para rendir homenaje al científico danés Niels Bohr (1885-1962), una de las mentes científicas más notables de nuestro tiempo y cuya labor, como la de Einstein, rebasó su especialidad para extenderse al humanismo y a la filosofía en un afán totalizador como el que caracterizó a los grandes sabios del Renacimiento. Fue Bohr un hombre —dice Marcos Moshinsky— cuyo destino sería contribuir en forma fundamental a una revolución en el campo de la física y, a partir de ella, a la vida de la humanidad entera.

En su calidad de físico, Bohr fue autor de numerosas ideas brillantes, como su modelo del átomo, que permitió comprender la Tabla Periódica de los Elementos, y de otros aspectos del conocimiento científico en los que fue notable impulsor y decisivo partícipe; por ejemplo, el desarrollo de conceptos esclarecedores sobre la compleja mecánica cuántica y el problema de las fluctuaciones del campo electromagnético. Su trabajo es de una profundidad y alcance tales que en los círculos científicos aún se le discute o se desarrollan sus ideas.

Por otra parte, como el misterioso personaje acerca de cuya desaparición trata el novelista italiano Leonardo Sciascia, Bohr se dio cuenta del peligro que significaba la energía nuclear y aunque contribuyó a la construcción de la bomba atómica (o mejor, nuclear), se opuso con todas sus fuerzas a su fabricación y proliferación. Así en junio de 1950 escribió una carta abierta a las Naciones Unidas en la que decía: "En los últimos años los sucesos políticos mundiales han aumentado la tensión entre las naciones y, al mismo tiempo, la perspectiva de que los países mayores puedan competir entre sí y convertir grandes porciones de la Tierra en zonas inhabitables ".Terminaba exigiendo un ajuste internacional que llegara hasta la raíz del conflicto, acción "indispensable si la civilización debe sobrevivir".

El presente volumen de la colección La ciencia para Todos ofrece al lector una imagen multidimensional de Niels Bohr, gracias a las plumas de Leopoldo García-Colín, Marcos Mazari y Marcos Moshinsky, coordinadores, y de Mariano Bauer, Virgilio Beltrán, Jorge Flores Valdés, Eugenio Ley Koo, Arturo Menchaca Rocha y Octavio Novaro, más la participación de Pier A. Mello y Octavio Obregón, en un diálogo entre científicos, todos quienes abordan tanto aspectos acerca de la personalidad del eminente hombre de ciencia, uno de los más notables del siglo XX, como otros interesantes temas: la formulación del principio de correspondencia creado por él, su relación con Einstein y con otros científicos, el esencial descubrimiento del neutrón, la teoría corpuscular de la luz, etcétera.

Indice