

La física y la mecánica cuántica

Por Luis ESTRADA

Desde las primeras etapas de su historia, el hombre ha manifestado un profundo interés por conocer el mundo en el que vive. El esfuerzo por saber cómo es el Universo es tan antiguo como la humanidad y estuvo muchos siglos bajo la tutela de la filosofía, hasta que en el siglo XVI se independizó para formar la ciencia natural contemporánea. Un aspecto fundamental del conocimiento del Universo, el más importante para la mayor parte de los científicos, es el de la estructura de la materia, esto es, saber en qué forma y cómo está hecho el material del Universo. En este artículo consideraremos únicamente una faceta del estudio de la estructura de la materia: aquella relacionada con el problema de la *descripción del movimiento de los sistemas microscópicos*.

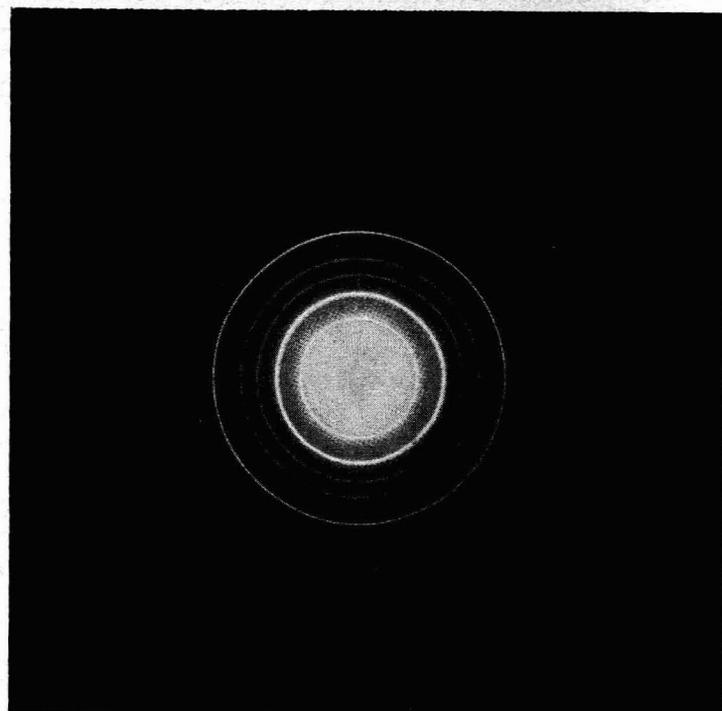
La estructura discreta o atomística de la materia es en la actualidad un hecho completamente aceptado. Considerando elementos estructurales cada vez más pequeños, el estudio de la materia se acostumbra dividir en las siguientes disciplinas: la Química o Física de las moléculas, la Física Atómica, la Física Nuclear y la Física Subnuclear o Física de las Partículas Fundamentales. Aunque el problema que se considera aquí es del dominio de todos estos campos de la Física microscópica, nos restringiremos en la mayor parte de lo que sigue al caso de la Física Atómica, a fin de poder concretar las ideas en un contexto mejor conocido. Empecemos con un resumen de las ideas comunes sobre los átomos. Estos pueden imaginarse como pequeños sistemas planetarios en los cuales el núcleo atómico ocupa el lugar del sol y los electrones giran alrededor de él. Las distancias en estos sistemas son del orden de un cienmillonésimo de centímetro y las energías del orden de decenas de electrón-volts, es decir, del orden de cienmilmillonésimos de ergio. El elemento fundamental en la estructura atómica es el electrón y puede decirse que la Física Atómica es el estudio de los sistemas de electrones sometidos a las fuerzas producidas por los núcleos, las cuales son de naturaleza eléctrica. Para completar la descripción del sistema atómico sólo hay que añadir que los átomos producen y absorben luz, y que el análisis de esta luz dio origen a una rama de la Física: la Espectroscopia Atómica, la cual fue decisiva en el estudio de la estructura de los átomos.

El modelo planetario de los átomos, antes mencionado, fue propuesto por Rutherford en el año de 1911, época en la cual la descripción del movimiento de los cuerpos estaba dada, con todo éxito, por la Mecánica Clásica. Es bien conocido cómo Newton construyó la Mecánica a partir de la observación del movimiento de los cuerpos en el dominio de la vida cotidiana. Del estudio de las propiedades de los cuerpos materiales en relación con sus movimientos, se formó la idea de partícula material, que es el concepto más usado en la Mecánica Clásica. La partícula material es una imagen adecuada para representar los cuerpos en movimiento y consiste en suponer que dichos cuerpos pueden describirse como puntos geométricos dotados de propiedades físicas como masa, carga, etcétera. Puede decirse que la Mecánica Clásica consiste en el estudio del movimiento de partículas materiales, o de sistemas formados por ellas, que resulta de la acción de las fuerzas producidas entre ellas mismas o por algún agente externo. En la Mecánica Clásica la descripción del movimiento es, en cierta manera, independiente de la naturaleza real de los cuerpos considerados y es frecuente encontrar movimientos idénticos de partículas que representan cuerpos que desde otro punto de vista podemos distinguir. La razón de este defecto aparente es que el concepto de partícula material no contiene, ni tiene por qué contener, toda la información posible de un cuerpo material, sino sólo aquella que concierne al movimiento. Por lo tanto, el conocimiento que podemos esperar de la Mecánica Clásica se refiere a *cómo se mueven los cuerpos*, los cuales han sido representados de antemano como partículas.

Una disciplina en la cual el concepto de partícula material no es adecuado es la Óptica. Sabemos cómo Newton intentó formular una teoría corpuscular de la luz, tratando de explicar los fenómenos luminosos en términos de partículas materiales y cómo fracasó en vista de los experimentos conocidos ya en aquella época, por ejemplo los experimentos de interferencia y difracción de la luz. La explicación de los fenómenos luminosos pudo darse finalmente en términos de ondas, las cuales constituyen una noción completamente diferente a la de las par-

tículas materiales, aunque se originó también en la Mecánica Clásica. El concepto de onda fue construido a partir del estudio del movimiento de los cuerpos elásticos y puede decirse que una onda no es más que una imagen refinada de un movimiento vibratorio generado en un cuerpo elástico. El ejemplo más conocido de ondas es el de las ondas sonoras, que son vibraciones del aire producidas por cuerpos en movimiento. Debe notarse que toda onda mecánica presupone un medio material sobre el cual pueda producirse, el cual es el aire en el ejemplo de las ondas sonoras. Revisemos brevemente la historia de la Óptica. Las investigaciones iniciadas por Hooke y Huygens en el siglo XVII para establecer un modelo ondulatorio de la luz fueron terminadas con éxito por Maxwell en 1864 al identificar la luz como un fenómeno electromagnético. El ente fundamental de la Teoría Electromagnética es el campo electromagnético, elemento físico producido por las cargas eléctricas y responsable de las interacciones entre ellas. Si se somete una carga a la acción de una fuerza que la acelere se produce un campo electromagnético, en forma de ondas, que se propaga con velocidad de trescientos mil kilómetros por segundo. Aunque estas ondas son semejantes a las sonoras, poseen muchas propiedades más y exhiben los efectos típicos de interferencia y difracción conocidos de los experimentos ópticos. Dos descubrimientos más acabaron la Teoría Electromagnética. En primer lugar los trabajos de Lorentz, realizados entre el final del siglo pasado y el principio del presente, que establecieron la conexión entre el movimiento de las cargas y las características del campo electromagnético producido por ellas, fundando así la teoría clásica de la Radiación. En segundo lugar el descubrimiento de Einstein, en 1905, de la teoría de la Relatividad Especial, la cual mostró que las ondas electromagnéticas se propagan sin necesidad de ningún soporte material y eliminó así la hipótesis de la existencia del éter.

Antes de seguir adelante es importante preguntarse cómo proceden los físicos al elaborar sus teorías. Para responder a esta pregunta hay que empezar por asentar un hecho trivial: la Física es una ciencia experimental. La primera noción acerca de la existencia de los fenómenos físicos la hemos obtenido mediante nuestros sentidos y hemos aprendido a ampliar nuestra percepción construyendo aparatos, los cuales nos han permitido llegar a dominios muy alejados de la experiencia cotidiana. También hemos aprendido, y esto es lo más importante, a provocar y alterar los fenómenos físicos de una manera controlada y reproducible, con lo cual nuestra experiencia en ciertos dominios, por ejemplo la Física Atómica, es en la actualidad muy



—Patrón de difracción de electrones

“transformaron la imagen del electrón de partícula material a onda”

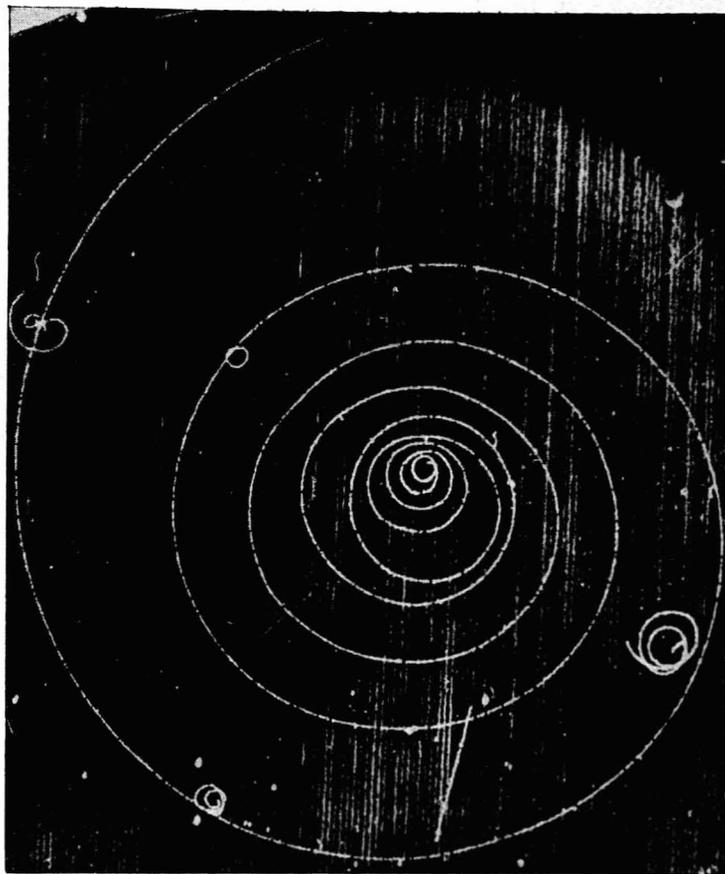
clara y firme. Sobre esta base experimental descansan nuestras teorías, las cuales se fundan en una confrontación continua entre experimentos y explicaciones de ellos, que puede esquematizarse como sigue: se efectúan observaciones y experimentos, se dan explicaciones e interpretaciones de ellos, se coordinan y se establecen concordancias entre diferentes interpretaciones, se obtienen consecuencias de esas explicaciones generalizadas y se proponen nuevos experimentos, los cuales no sólo nos permitirán verificar y aclarar nuestras teorías sino también ampliarlas y modificarlas. Hay que añadir a esto la aclaración de que si bien un experimento puede probar que una teoría es errónea, ningún experimento o conjunto de ellos puede demostrar la validez de una teoría. Nuestro criterio para construir o aceptar una teoría es: su estructura lógica, representada por su consistencia matemática y la continua verificación experimental de sus predicciones.

Volviendo a nuestro tema, la Mecánica Cuántica nació en 1900 con el famoso trabajo de Planck sobre la distribución de la energía de la radiación del cuerpo negro y puede decirse que este acontecimiento marca el principio de la Física Moderna. El experimento típico para este estudio consiste en calentar hasta una cierta temperatura un cuerpo en cuyo interior se ha hecho una cavidad vacía. Por efecto del calentamiento se produce radiación electromagnética que llena la cavidad y se establece un intercambio de energía entre las paredes de la cavidad y la radiación, debido a la continua emisión y absorción de ésta por aquéllas. En el estado de equilibrio las velocidades de emisión y absorción son iguales y puede conocerse cómo se distribuye la energía de la radiación, según las diferentes longitudes de onda, analizando a ésta cuando se le permite salir al exterior por un pequeño orificio.

Aprovechando el descubrimiento, hecho por Kirchhoff, de que en un estado de equilibrio la distribución de la energía de la radiación es independiente de la naturaleza del material del cuerpo caliente, Planck consideró como material de las paredes de la cavidad a un conjunto de osciladores como los usados en la Teoría Clásica de la Radiación. Suponiendo que cada uno de estos osciladores emite y absorbe radiación de frecuencia igual a la frecuencia propia y utilizando argumentos de la Termodinámica, Planck obtuvo una fórmula semiempírica que resumió todo el conocimiento experimental sobre la distribución de la energía de la radiación del cuerpo negro. Esta fórmula se conoce ahora como la Ley de Planck y fue presentada por su autor con la afirmación de que por una propiedad aún desconocida de la *interacción entre la radiación y la materia*, ésta emite y absorbe energía en cantidades discretas, proporcionales a la frecuencia de la radiación. Según esta explicación, la emisión y absorción en el dominio atómico no se efectúa de manera continua sino en forma *cuantizada*, es decir, "a saltos". Einstein propuso otra explicación, interpretando la emisión y absorción cuantizada como una *propiedad del campo de radiación* y afirmó que éste está formado por elementos individuales: los cuantos de la radiación, posteriormente llamados fotones, y que por lo tanto la radiación encerrada en la cavidad puede considerarse como un gas. Einstein aplicó estas ideas al estudio del efecto fotoeléctrico y en 1905 publicó una teoría que lo explicaba satisfactoriamente. Es interesante hacer notar que la Mecánica Cuántica se inició con el problema de entender los aspectos corpusculares de un sistema que la Física Clásica había descrito mediante ondas: el campo de radiación.

Un antecedente muy importante del nacimiento de la Mecánica Cuántica fue el descubrimiento del electrón, realizado por Thomson en 1897, con el cual se confirmó definitivamente la teoría atomística de la materia, ya que exhibió el ingrediente básico que la constituye. Thomson descubrió el electrón al estudiar los rayos catódicos y, por lo tanto, su naturaleza fue encontrada al explicar qué eran dichos rayos. En aquel momento la explicación más simple que podía darse de la naturaleza de los rayos catódicos era en términos ondulatorios, ya que se tenía a la mano la experiencia, y la influencia, de los estudios sobre los rayos X. Como esta explicación presentaba dificultades, los físicos introdujeron una gran variedad de hipótesis, algunas tan exageradas como la proposición de Crookes de aceptar un cuarto estado de la materia. Finalmente Thomson probó en forma concluyente que los rayos catódicos eran haces de partículas materiales, cargadas negativamente y midió la relación entre su carga y su masa.

Consideremos nuevamente el estudio de la estructura de la materia, situándonos en la época inmediatamente posterior al descubrimiento del modelo planetario del átomo realizado por Rutherford. Se sabía que los átomos son sistemas de electrones que se mueven sujetos a la fuerza eléctrica producida por el núcleo atómico y se hablaba de órbitas de los electrones en for-



—Rastro de un electrón en una cámara de burbujas
"un electrón es simplemente un electrón".

ma semejante a las órbitas de los planetas. Sin embargo, este modelo era completamente inadecuado para explicar las características esenciales de los átomos, como son su extraordinaria estabilidad, la identidad de su estructura cuando se obtienen de un mismo elemento químico, la organización tan regular y característica de sus espectros de emisión y absorción y sus propiedades regenerativas, que aseguran la formación de los mismos átomos independientemente de cómo se sintetice el elemento químico en cuestión.

El entendimiento de la estructura atómica empezó en 1913 cuando Bohr y Ehrenfest, en forma independiente, descubrieron que una cantidad mecánica, el impulso angular, esencial en la determinación de las órbitas, se presentaba en los átomos en forma cuantizada. Bohr aprovechó inmediatamente este descubrimiento para explicar, formulando dos hipótesis famosas, las propiedades características del espectro del átomo del hidrógeno que Balmer había estudiado y clasificado con anterioridad. Posteriormente, en 1921, Landenburg reconsideró el problema del espectro atómico, enfatizando, como Planck, que se trataba de un problema de *interacción* entre la radiación y los átomos. Modificó la teoría de la radiación afirmando que el átomo, al emitir o absorber luz, se comporta como un conjunto infinito de osciladores virtuales capaces de ser excitados. Con estas ideas Landenburg pudo formular una teoría cuántica de la dispersión de la luz por los átomos, introduciendo un enfoque más realista, ya que basó toda su teoría en datos obtenidos directamente de los experimentos, principalmente de la Espectroscopia, dejando a un lado las órbitas electrónicas que son inobservables. Heisenberg comprendió que este enfoque, basado en los *datos directamente observados*, era el correcto y formuló una teoría en la que caracterizaba el átomo mediante osciladores virtuales. Inmediatamente después Born introdujo un esquema matemático adecuado a las ideas de Heisenberg y fundó la llamada Mecánica Matricial. Finalmente, en 1925, Heisenberg, Born y Jordan dieron la versión final de la Mecánica Matricial que, aunque no daba una imagen sencilla del movimiento de los electrones como lo hacía el modelo planetario, era capaz de dar una explicación de la estructura atómica consistente con los datos espectroscópicos. Como en esa época se pensaba que no dar una imagen del movimiento de los electrones, como lo hubiera hecho la Mecánica Clásica, era un defecto de la teoría, Born propuso, en 1926, la llamada interpretación probabilística, la cual afirmaba que de la Mecánica Matricial se podía conocer la probabilidad de encontrar un electrón, imaginado como una partícula material, en cada región del espacio.

Otra escuela que explicó la estructura atómica fue iniciada por de Broglie, en 1923, con un trabajo en el que explotaba la analogía entre el Principio de Fermat, de la Óptica, y el Prin-

cipio de la acción mínima, de la Mecánica Clásica, enfoque que en apariencia era totalmente diferente al de la Mecánica Matricial. De Broglie sugirió que al electrón, y a cualquiera otra partícula material, debe asociársele un sistema de ondas de tal manera que la velocidad de esta partícula quede identificada con la velocidad de grupo de esas ondas. Basándose en la Teoría de la Relatividad Especial, De Broglie interpretó las ondas luminosas como las ondas asociadas al fotón e inmediatamente copió esta idea para el caso de los electrones, inventando las ondas asociadas a ellos. Las reglas de cuantización que Sommerfeld y Wilson habían introducido empíricamente con anterioridad para explicar la cuantización del impulso angular, resultaron ser una consecuencia natural de arreglos de las ondas de De Broglie. Elsasser, buscando consecuencias observables de estas ideas, sugirió hacer experimentos de difracción con electrones, los cuales fueron realizados con éxito por Davisson y Germer en 1927. La versión final de esta teoría, conocida como la Mecánica Ondulatoria, fue presentada durante el año de 1926 independientemente por De Broglie, Schrödinger y Klein, quienes propusieron ecuaciones de ondas, muy semejantes, para los electrones. Schrödinger presentó la cuantización como un "problema de condiciones en la frontera" de las ondas del electrón y pudo obtener también los resultados de Balmer del espectro del átomo del hidrógeno. Podemos resumir los descubrimientos de la Mecánica Ondulatoria diciendo que De Broglie y Schrödinger, en contraste con lo que Einstein hizo en el caso de la luz, transformaron *la imagen del electrón de partícula material a onda*, adaptando la idea clásica de onda para la descripción de los electrones.

El desarrollo de la mecánica atómica fue extraordinariamente rápido. En menos de dos años, a partir de la publicación del primer artículo de Heisenberg, en julio de 1925, el problema de la estructura atómica quedó esencialmente fundamentado. Se sabía que tanto la Mecánica Matricial como la Ondulatoria eran adecuadas para la descripción del movimiento de los electrones en los átomos. La característica esencial de este movimiento de los electrones consiste en que solamente se presenta en ciertos estados que pueden ser numerados, por lo cual se acostumbra clasificar las configuraciones electrónicas posibles asignando a cada estado una colección de números: los llamados números cuánticos. En 1924 Pauli había descubierto el Principio de Exclusión, el cual consiste en que los electrones en un átomo no pueden ocupar simultáneamente el mismo estado de movimiento, es decir, que los electrones en su movimiento ocupan estados cuyos números cuánticos no pueden ser todos iguales. El Principio de Exclusión constituye una de las propiedades fundamentales de la naturaleza de los electrones y, gracias a él, las configuraciones electrónicas de los átomos, conocidas de los estudios espectroscópicos, quedaron completamente aclaradas. Sin embargo, la Mecánica Cuántica, en el sentido propio en el que ahora la entendemos, quedó establecida a fines de 1926, fecha en la que Dirac descubrió que la Mecánica Matricial y la Mecánica Ondulatoria eran aspectos diferentes de una misma teoría. El mismo Dirac coronó la Mecánica Cuántica reformulando la ecuación de ondas para el electrón de una manera consistente con la Teoría de la Relatividad Especial y predijo la existencia de una nueva partícula: el electrón positivo o positrón que fue observado por Anderson en 1932 entre las partículas de la radiación cósmica. Para presentar la Mecánica Cuántica en forma completa y sistemática, Dirac publicó, en 1930, su libro *The Principles of Quantum Mechanics* el cual continúa siendo una referencia indispensable sobre el tema.

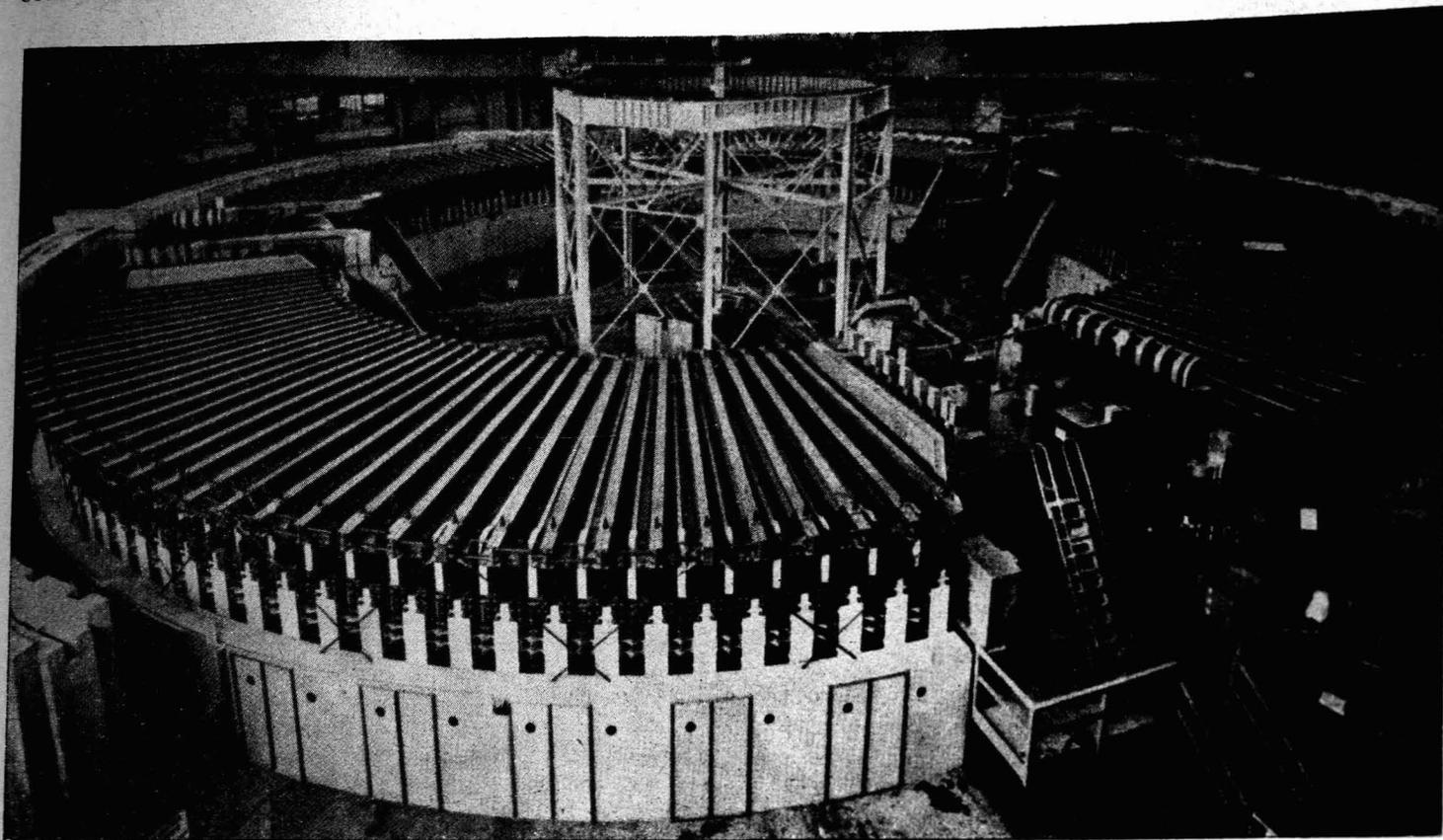
En 1927 Dirac construyó una teoría cuántica de la radiación, la cual permitió fundamentar las ideas que Einstein había introducido para explicar la naturaleza de la radiación electromagnética. Para esto, Dirac reinterpretó el campo clásico de radiación cambiando el significado de las expresiones matemáticas que lo describen. Formuló las leyes que los nuevos términos matemáticos deben satisfacer y mostró que el campo de radiación está constituido por elementos individuales, los cuales identificó con los fotones o cuantos del campo de radiación, introducidos anteriormente por Einstein. Con este método, que permitió entender los aspectos corpusculares de la luz y que ahora se conoce como la cuantización del campo electromagnético, Dirac construyó la teoría cuántica de la radiación antes mencionada y justificó la conexión, establecida empíricamente por Bohr en 1913, entre la radiación emitida y absorbida y los niveles de energía de los estados de los electrones en los átomos. Entre los años de 1927 y 1930, Jordan, Wigner, Fermi, Heisenberg y Pauli complementaron la teoría cuántica de la radiación de Dirac estableciendo una forma para interpretar a los electrones como cuantos de un campo: el llamado campo de Dirac. Como resultado de todos estos esfuerzos nació una teoría que

pudo explicar consistentemente a los fotones, a los electrones y a sus interacciones y que se conoce como la Electrodinámica Cuántica. En esta teoría se parte de los campos electromagnético y de Dirac, los cuales se reinterpretan de acuerdo con ciertas leyes y se acoplan en todo el espacio; los fotones y los electrones resultan ser los cuantos respectivos de dichos campos.

La etapa inicial de la Electrodinámica Cuántica fue muy difícil. Su manejo matemático era muy complicado y aunque se sospechaba consistente con la Teoría de la Relatividad Especial no era posible probarlo. Sin embargo, permitió explicaciones y cálculos que, aunque aproximados, resultaron en buena concordancia con los resultados experimentales en el dominio atómico conocido en aquel entonces. Fue hasta 1947 cuando gracias a los trabajos de Feynman, Schwinger, Tomonaga y Dyson, la Electrodinámica Cuántica pudo ser formulada en forma satisfactoria, realizándose al fin el programa de la Mecánica Cuántica trazado por Planck y Einstein. La Electrodinámica Cuántica consiguió, al menos para el fotón y para el electrón, una explicación de *qué es una partícula* en el marco de la Mecánica Cuántica. Es una característica esencial de esta teoría que el concepto de partícula no es un concepto general. Cuando en la Electrodinámica Cuántica se habla de partículas solamente se hace referencia a fotones y a electrones y ninguno de ellos resulta semejante ni a la partícula material ni a la onda clásicas. Además, aun cuando se pueden asignar propiedades de tipo ondulatorio y corpuscular tanto a los fotones como a los electrones, la imagen que tenemos en la actualidad de cada uno de ellos es muy diferente en cada caso. Es posible hacer experimentos de difracción tanto con haces de fotones como con haces de electrones, pero averiguar dónde se encuentra un fotón tiene mucho menos sentido que localizar un electrón. Los fotones no cumplen con el Principio de Exclusión como lo hacen los electrones. Si a un físico contemporáneo se le pregunta si un electrón o un fotón es una partícula y contesta afirmativamente, es seguro que piensa en un concepto de partícula muy diferente al que pensaría si se refiriese a un satélite. No es difícil encontrar físicos que digan que un electrón es simplemente un electrón. La validez de las imágenes modernas del electrón y del fotón descansan en la consistencia interna de la Electrodinámica Cuántica, la cual, aunque hasta el presente no ha sido posible exhibirla en forma definitiva, la mayor parte de los físicos sospechan que existe, debido a la extraordinaria concordancia entre sus predicciones y los experimentos realizados hasta el presente. Como un ejemplo de esta concordancia mencionaremos la situación actual en el conocimiento del momento magnético del electrón. Desde el año de 1925 se sabe que el electrón se comporta como un pequeño imán, lo cual se descubrió mediante el estudio de átomos colocados en campos magnéticos. La magnitud utilizada para cuantear las propiedades de los imanes es su momento magnético. Mediante experimentos muy ingeniosos y refinados se ha medido esa magnitud para el electrón y se conoce su valor hasta términos en la novena cifra decimal. La Electrodinámica Cuántica permite explicar por qué el electrón tiene propiedades magnéticas y los cálculos hechos con su ayuda para evaluar el momento magnético de esa partícula predicen hasta la séptima cifra decimal y concuerdan con el valor experimental.

De lo dicho hasta aquí hay dos preguntas que aparecen de manera natural. En primer lugar, sin llegar hasta el marco de la Electrodinámica Cuántica, esto es, restringiéndose a la Mecánica Cuántica en sentido propio, ¿cuál es la imagen de partícula que podemos obtener? En segundo lugar, es bien conocido que existen muchas más "partículas" en el mundo microscópico como el protón, el neutrón, los piones, los neutrinos, etcétera, ¿qué es lo que la Física Moderna entiende por partícula en esos casos?

Si revisamos el boceto histórico de la evolución de la Física Cuántica antes presentado, la respuesta a la primera pregunta resulta muy natural: *la Mecánica Cuántica no da entre sus resultados o predicciones la imagen de partícula*. La Mecánica Cuántica, como la Clásica, no pretende explicar *qué* es una partícula, sino simplemente describir *cómo* se mueve. El concepto de partícula se introduce de antemano y hay, por tanto, varias posibilidades. La posición más común frente a este problema es la de aceptar la interpretación probabilística de Born, en virtud de la cual los resultados de la Mecánica Cuántica se expresan en términos de la probabilidad de encontrar una partícula material en una región determinada, por ejemplo en un contador. Otra interpretación consiste en dar los resultados en términos del número de partículas que hay en una cierta región, o bien, que inciden por unidad de tiempo en un lugar determinado, por ejemplo en un contador. Hay también quienes



"hemos aprendido a ampliar nuestra percepción" —El Bevatrón de la Universidad de California

interpretan los resultados de la Mecánica Cuántica en términos de ondas, en forma semejante a como se hace en la Óptica Clásica y se considera entonces la lectura del contador como una medida de la intensidad de la onda recibida en esa región.

Respecto a la segunda pregunta, relativa a lo que se entiende por partícula en la Física Moderna, hay que empezar por aceptar que ésta es una cuestión abierta hasta ahora. En la actualidad se habla de partículas fundamentales y se piensa que éstas son una especie de elementos, los más simples que existen, a partir de los cuales se puede obtener todo lo demás como compuesto. Como cada día se descubren más partículas, el problema de averiguar cuáles son las "realmente fundamentales" y cuáles son las "compuestas", resulta cada vez más complicado. Para la solución de este problema de las partículas fundamentales se han extendido las ideas básicas de la Electrodinámica Cuántica para describir las partículas supuestamente fundamentales y así se ha edificado la llamada Teoría General de los Campos Cuantizados. Las opiniones que los físicos tienen de esta teoría están muy divididas y gran parte de ellos la consideran con escepticismo. El intento más generalizado en la actualidad para entender las partículas conocidas consiste en construir una teoría a partir de los datos experimentales en la forma más directa posible. Otra solución propuesta, en la cual se tienen muchas esperanzas por ahora, consiste en construir una teoría de las partículas en la cual ninguna de las conocidas sea fundamental. Independientemente de cuál sea la solución que se dé al problema de las partículas, podemos asegurar que la imagen que de ellas se obtenga será *diferente de la imagen clásica* y será construida a partir de nuestro *conocimiento experimental* de las "partículas" ahora conocidas.

¿Cuáles son las enseñanzas que hemos aprendido de la Mecánica Cuántica? Podemos responder a esta pregunta señalando varios aspectos introducidos durante el desarrollo de la Mecánica Cuántica y que ahora son característicos de la Física Moderna. En primer lugar, la necesidad de aceptar una *descripción más abstracta* de los fenómenos físicos. Este aspecto de la Física Cuántica resultará, quizá, más comprensible si se considera que estudia una parte de la naturaleza, el mundo microscópico, la cual está muy alejada de nuestra experiencia cotidiana. En segundo lugar, la descripción del movimiento que obtenemos de la Mecánica Cuántica resulta ser menos detallada que la que obteníamos de la Mecánica Clásica. Quizá la explicación de este hecho resida en que hemos aceptado, sin mayor análisis, que la *descripción completa y detallada* del movimiento es precisamente la dada por la Mecánica Clásica. En tercer y último lugar mencionaremos el conocimiento más importante aportado por la Mecánica Cuántica, el cual la distingue esencialmente de la Clásica: la descripción de los fenómenos físicos del dominio microscópico *es incorrecta si se desprecia totalmente la perturbación introducida al observar un sistema*. En otras palabras: en el mundo microscópico no tiene sentido ha-

blar del estado de un sistema independientemente del método seguido para observarlo. Es incorrecto suponer que el estado de un sistema que observamos en un laboratorio es el mismo en el que el sistema estaría si no lo hubiéramos observado. Esta dependencia ineludible entre el observador y lo observado puede entenderse más sencillamente si se considera que el hecho de afirmar en un sentido absoluto que un sistema es microscópico, o pequeño, implica que todo lo demás y en particular lo que se emplea para observarlo es mayor o, a lo más, de las mismas dimensiones del sistema en consideración. Un ejemplo aclarará un poco más este punto: para producir y observar electrones utilizamos dispositivos formados también por electrones, lo cual se puede esquematizar afirmando que observamos electrones por medio de electrones. ¿Cómo se puede garantizar que el estado de los primeros se puede conocer independiente de los segundos que supuestamente se usaron sólo para observarlos? Con la Mecánica Cuántica hemos empezado a construir teorías en las cuales se toman en cuenta las perturbaciones inherentes a las observaciones. Con la Mecánica Cuántica hemos logrado describir a los sistemas físicos *en términos de los experimentos* que nos han permitido conocer sus características.

Para terminar este artículo es necesario añadir algunos comentarios sobre el aspecto matemático de la Mecánica Cuántica. Es bien conocido que este aspecto es muy especializado y abstracto y quizá es el responsable de que esta parte de la Física se considere hasta ahora como un conocimiento esotérico. Sin embargo, hay que aceptar que la Matemática es absolutamente necesaria para la formulación de cualquier teoría física. Es cierto que todo resultado científico se puede expresar en lenguaje llano si no importa mucha precisión y si se dispone de los medios necesarios para un sinfín de aclaraciones. Pero si se trata de una presentación concreta, precisa y rigurosa de un resultado, o de una parte de una teoría científica, el uso de la Matemática es ineludible, ya que ésta es el *lenguaje adecuado para describir los fenómenos naturales*. Es conveniente recordar aquí que la Matemática nació del esfuerzo para definir, precisar y rigorigar los conceptos e imágenes surgidos del estudio de la naturaleza. En el caso de la Mecánica Cuántica, la revisión de los conceptos clásicos y la proposición de los que habían de sustituirlos, dio lugar a la elaboración de una gran parte de la Matemática necesaria para la descripción de las partículas y de sus movimientos. Como resultado de esto es imposible una separación muy definida entre lo que podría llamarse el aspecto físico y el matemático de la descripción cuántica del mundo microscópico. La dificultad actual para la comunicación de los resultados de la Física Moderna estriba en que la Matemática que se enseña en los cursos de formación general no destaca las características esenciales de esa disciplina. Por el momento parece muy claro que la divulgación de la Física Moderna debe estar unida a la difusión del conocimiento contemporáneo de la Matemática.