



La física cuántica

Por Luis Estrada

1. Los inicios

En una conferencia impartida por Max Planck en Berlín el 14 de diciembre de 1900 para la Sociedad de física local, empezamos a saber de la física cuántica. En esa ocasión el profesor Planck dio a conocer una buena forma de describir el comportamiento del color de la luz producida por un cuerpo caliente. Este fenómeno no nos es totalmente desconocido pues sabemos por experiencia que si calentamos un pedazo de hierro éste se hace luminoso –tanto más brillante cuanto más caliente– y que su luz, como la solar, está compuesta por una extensa gama de colores que nos recuerda al arco iris. ¿Por qué sucede eso?

La forma de precisar el color de una luz es asignándole una cantidad llamada frecuencia. Cuando la luz pasa del rojo al amarillo y luego al violeta la frecuencia crece. Si seguimos aumentando la frecuencia la luz, ésta se hará invisible para nuestros ojos y diremos que se trata de luz ultravioleta. El crecimiento de la frecuencia nos conducirá a otras luces: los rayos X y los llamados “gamma”. La organización de las luces en término de sus frecuencias constituye el espectro electromagnético y la teoría correspondiente estaba firmemente establecida cuando Planck realizaba sus estudios. Sin embargo su aplicación a la emisión de luz por un cuerpo caliente predecía algo absurdo: el aumento de temperatura haría crecer sin límite a la frecuencia.

Planck fue un físico alemán que nació en 1858 y murió en 1947. Se doctoró en la Universidad de Munich en 1879 y su especialidad fue la termodinámica, esto es, el estudio de las propiedades de la materia relacionadas con las condiciones a las que ella está sujeta, en especial a su temperatura. Una característica esencial del estudio termodinámico es que puede tratar un objeto sin necesidad de detallarlo demasiado y por ello podemos saber mucho del comportamiento de un gas sin tomar en cuenta que está hecho de partículas. Sin embargo la curiosidad humana es insaciable y hemos construido otras disciplinas que extienden y detallan nuestros conocimientos. Desde fines del siglo pasado se sabía cómo usar la mecánica para explicar las conclusiones de los estudios termodinámicos en términos de las componentes básicas del objeto en consideración –la presión que ejerce un gas como resultado de que está hecho de partículas, por ejemplo.

Volvamos al pedazo de hierro y pensemos en su calentamiento. Si tal objeto tuviera una cavidad interna –una burbuja que quedó atrapada dentro de él, por ejemplo– al calentarlo la luz emitida en su interior llenaría la cavidad y entonces tendríamos algo como un frasco repleto de luz. No es extraño entonces estudiar la luz como un gas y preguntarse acerca de sus componentes. Antes de continuar debo señalar algo de apariencia paradójica a primera vista: un buen emisor puede ser también un gran absorbente, esto es, los objetos luminosísimos son la otra cara de los hoyos negros. Esto es claro si se piensa que una cavidad repleta de luz podría dejar escapar un haz de gran luminosidad, mientras que la misma cavidad, cuando está totalmente vacía, guardaría toda la luz que entrara en ella. Con esto se explica por qué los físicos se refieren al trabajo de Planck como el estudio de “la radiación del cuerpo negro”.

Para construir la fórmula que describe la distribución por frecuencias de la luz emitida por un cuerpo caliente –un cuerpo negro– Planck tuvo que suponer que la contribución de los elementos emisores de luz a la energía observada sólo puede hacerse en cantidades que son múltiplos enteros de una cierta porción básica. Para valuar a ésta Planck introdujo una cantidad que llamó el

“quantum” elemental de acción y abrió un nuevo camino que pronto permitiría empezar a entender una gran cantidad de fenómenos que ahora se califican como cuánticos. Como ha sucedido con otros grandes descubrimientos, Planck no pudo comprender lo que había encontrado y confesó que había supuesto la existencia de “paquetes discretos” de energía en un momento de desesperación al no encontrar otra manera para describir la radiación del cuerpo negro.

Albert Einstein, el más famoso físico del siglo XX principalmente por sus teorías de la relatividad, fue uno de los primeros en aprovechar la hipótesis de Planck. En 1905 publicó una explicación del efecto fotoeléctrico –la producción de electricidad por incidencia de luz en metales– basada en que la luz es de naturaleza atómica. Einstein consideró a la luz como un gas formado por un gran número de partículas cuyas energías eran acordes con los “quanta” de Planck y explicó el efecto fotoeléctrico como el resultado del bombardeo de esos cuerpos sobre las partículas componentes del metal. Estas son los electrones, corpúsculos electrizados que habían sido descubiertos ocho años antes por el físico inglés Joseph John Thomson.

Ahora sabemos que la luz tiene estructura atómica pues está formada por fotones y que la electricidad también, ya que se compone de electrones. Durante los siglos XVIII y XIX, la teoría atómica de la materia se desarrolló mucho, especialmente por los esfuerzos de científicos como Daniel Bernoulli, John Dalton y Amadeo Avogadro. Sin embargo, todavía a fines del siglo XIX su aceptación era muy reducida, aún entre los físicos. Los descubrimientos de Planck y Einstein cambiaron esa situación, aparte de poner los cimientos para la construcción de la teoría atómica actual de la materia.

2. La formación de la mecánica cuántica

Aunque se afirma que la física cuántica nació con el descubrimiento de Planck, su formulación se inició en 1925 gracias a los trabajos de Werner Heisenberg. Es indudable que la mecánica cuántica, como casi todas las teorías científicas modernas, es una obra colectiva resultante de una gran variedad de esfuerzos personales realizados durante muchos años y en diversos lugares. Sin embargo, buscando los antecedentes determinantes de lo que ahora sabemos de ese campo, es imposible pasar sin detenerse en un artículo –fechado en 1925– en el que ese físico alemán señaló la importancia de cambiar la formulación matemática de los fenómenos que ocurren en el mundo atómico.

A partir del año siguiente, esto es en 1926, el desarrollo de la mecánica cuántica fue espectacular. En ese año Erwin Schrödinger formuló la famosa ecuación que desde entonces lleva su nombre y con ella los físicos iniciaron la construcción del gran edificio que alberga ahora a las explicaciones de los fenómenos atómicos y moleculares. Poco después se puso en limpio la estructura matemática de la teoría cuántica, especialmente por los trabajos del físico inglés Paul Adrien Maurice Dirac y del matemático norteamericano, de origen húngaro, John von Neumann. Los logros de la mecánica cuántica fueron tan numerosos que listarlos llenaría esta revista. Sin embargo no todo es miel sobre hojuelas pues la lista de problemas pendientes de resolver también fue creciendo.

Cuando un conjunto de átomos es sometido a una acción externa –un calentamiento o el paso de una corriente eléctrica– ellos emiten radiación electromagnética –luz, por ejemplo. El caso del hidrógeno gaseoso fue el ejemplo favorito en los laboratorios de física y en él se experimentó mucho, por lo que la serie de líneas luminosas que produce es bien conocida y constituye una

especie de “modelo” para el estudio de la emisión atómica. Sin embargo, en 1947 el físico norteamericano Willis Lamb, con la ayuda de su estudiante Robert Retherford y aprovechando las técnicas para el manejo de microondas desarrolladas durante la segunda guerra mundial, descubrió algo inesperado: una de las líneas luminosas del hidrógeno era compuesta y podía separarse en dos, lo se pensaba era imposible de acuerdo con la teoría cuántica aceptada en esos momentos.

El “corrimiento Lamb”, nombre dado al fenómeno antes mencionado reavivó el estudio de la mecánica cuántica. Unos cuantos meses después los norteamericanos Julian Schwinger y Richard Feynman publicaron una reformulación de la teoría que nos ocupa con la cual se podía explicar –y calcular– la separación de líneas descubierta por Lamb. Ahora sabemos que ese corrimiento es debido a la acción del “vacío electrónico” en el átomo de hidrógeno pues el vacío cuántico no es la ausencia de todo, como ingenuamente podría pensarse, sino sólo la ausencia de partículas tangibles. El desarrollo de la física cuántica ha continuado hasta nuestros días y no es éste el lugar para seguir esbozando su historia.

3. ¿Qué es la Física cuántica?

La naturaleza atómica de la materia es algo ahora aceptado. Sin embargo para comprender al mundo microscópico hay muchas dificultades, ya que el comportamiento de sus componentes es muy diferente al de los que forman al mundo de la vida cotidiana y fue necesario construir la física cuántica para explicar ese comportamiento. Lo común es pensar que la aceptación de que la materia tiene una estructura atómica es la aprobación de que toda sustancia está compuesta por partes irreducibles –átomos en su sentido literal– y que éstas son las partículas estudiadas en la mecánica newtoniana –las llamadas masas puntuales. Lo primero es correcto aunque lo segundo no, ya que suponerlo conduce a predicciones falsas como las que tuvo que enfrentar Planck al estudiar la radiación del cuerpo negro.

Cuando un haz luminoso incide en un vidrio parte de él lo atraviesa y la otra parte se refleja. Si consideramos que la luz está formada por fotones –esto es, tiene estructura atómica– explicaríamos la experiencia anterior diciendo que la superficie del vidrio admite que algunos fotones sigan su camino y que otros boten y regresen. La aceptación de la estructura atómica obliga a responder qué sucede a cada componente y cabe preguntarse que sucedería si incide un sólo fotón en la superficie del vidrio; ¿el fotón pasa o se regresa? Antes de tener una respuesta surge, inevitablemente, otra pregunta: ¿el fotón es una partícula puntual?

Para estudiar el comportamiento de los fotones la mecánica cuántica no empieza presuponiendo que tienen una forma específica pues la noción de partícula que esa teoría ha elaborado es muy flexible y ajustable. Se define en relación al tipo de observación o experimento en el que intervendrá la partícula y ella puede ser imaginada con modelos de la física clásica: un corpúsculo o una onda. Así, cuando se trata de determinar imágenes formadas por cuerpos luminosos, como las estrellas, se emplea la noción de “rayo de luz”, trayectoria análoga a la que seguiría una partícula de las tratadas en los libros de mecánica newtoniana. Si para estudiar el mismo cuerpo se hace que la luz que emite provoque un efecto de interferencia, se empleará la noción de onda luminosa, aunque el detector de luz sea un contador de fotones. Esto hace que muchos hablen de la “dualidad corpúsculo-onda” cuando explican los fenómenos luminosos.

La mecánica cuántica describe el comportamiento del fotón que incide en la superficie de un vidrio

afirmando que se trata de un asunto de probabilidad: el fotón puede atravesar el vidrio o reflejarse de acuerdo con las propiedades de transparencia y reflectividad del vidrio. Suponiendo que éstas sean en alguna forma igualmente posibles, la probabilidad de transmisión y de reflexión serán las mismas, esto es el 50%. Lo que hay que subrayar es que el fotón pasa o no pasa, es decir, no pierde su individualidad. Esta forma de explicación ilustra una de las características básicas de la física cuántica: es una teoría de naturaleza probabilista y esto la distingue en forma especial de la mecánica clásica pues da un lugar esencial al indeterminismo.

Lo dicho para los fotones –los “átomos” de la luz– es válido para todas las partículas del mundo microscópico: los electrones, los protones, los neutrones y muchas otras partículas que forman la materia. Por esto los electrones, por ejemplo, pueden interferir y difractarse en forma análoga a como lo hacen los fotones, así como seguir determinadas órbitas en un acelerador de partículas, como se esperaría de las masas puntuales. Debe notarse que para describir estos aspectos del comportamiento electrónico es natural emplear imágenes tomadas de la física clásica: las ondas y las partículas. Empero, aunque la forma cuántica de describir a las partículas parezca vaga, su utilidad ha resultado asombrosa y con ello la mecánica cuántica nos ha facultado para explicar en “forma atómica” fenómenos que a primera vista no parecerían admitir tal tipo de explicación. Un ejemplo es describir la transmisión del sonido en una red cristalina como el paso de un haz de partículas llamadas fonones. De esta manera se explican ahora, en forma análoga a la propagación de la luz, las propiedades de la conducción del calor en muchos materiales sólidos.

Hay muchas más particularidades de la física cuántica que nos están ayudando a entender los fenómenos del mundo microscópico, como el ya mencionado comportamiento del vacío y no hay lugar aquí para siquiera enumerarlos. Sin embargo es imposible no mencionar algo que esa teoría nos ha mostrado: toda observación altera lo observado. En las palabras de uno de los creadores de la física cuántica, el profesor Dirac, este hecho se enuncia afirmando que *la fineza de nuestra capacidad para observar y la disminución del disturbio ocasionado por esa acción tienen un límite, el cual es inherente a la naturaleza de las cosas*. Como es de esperarse este descubrimiento ha tenido consecuencias muy importantes en la construcción de la ciencia actual pues, como bien sabemos, esta está basada en la observación de los fenómenos que ocurren en el universo.

4. La física cuántica hoy

Entre los logros más difundidos de la teoría cuántica está la física atómica moderna, la disciplina que explica las propiedades de las componentes básicas de los elementos químicos. Así sabemos, por ejemplo, que el helio es un gas cuyos átomos están formados por dos electrones unidos por una fuerza eléctrica producida por un núcleo muy pesado. Las propiedades de este elemento pueden explicarse satisfactoriamente en términos de la teoría cuántica, tanto en forma cualitativa como cuantitativa. Esa misma teoría nos ha permitido construir la física nuclear, que explica cómo está formado el núcleo atómico y por qué tiene las propiedades que lo caracterizan. En el caso del helio esta disciplina nos ha dilucidado por qué es tan pesado su núcleo y por qué su forma natural es estable. Sabemos ya que las componentes de los núcleos –los protones y los neutrones– son también compuestos y que sus propiedades pueden describirse en términos cuánticos. Todo lo que hemos aprendido del mundo microscópico está ahora escrito en el lenguaje de la física cuántica.

Por el otro extremo, el de lo grande del universo, el conocimiento cuántico es también esencial. La vida de las estrellas y la formación de los elementos durante la evolución universal requieren del

saber cuántico para su explicación. Más aún, el conocimiento de los primeros momentos de la existencia del universo ha sido elaborado gracias al desarrollo de la física cuántica. La “forma” del universo y la especulación acerca del futuro del mismo objeto son también temas que requieren de la física cuántica, aunque en este caso la aportación de esta teoría es todavía incipiente pues no contamos aún con una explicación cuántica de los fenómenos gravitatorios. Acerca de esto último cabe mencionar que hay ideas atractivas y promisorias que animan mucho la investigación en ese campo y que nos dan esperanza de extender con buen éxito nuestro conocimiento y confiar en que pronto dispondremos de una “teoría cuántica de la gravitación”.

En la vida cotidiana la presencia del conocimiento cuántico es cada día mayor aunque todavía encubierta. La comunicación mediante satélites y teléfonos celulares, las computadoras y los lectores de discos compactos y códigos de barras emplean “circuitos integrados” –“chips”– para su funcionamiento y éstos están formados por transistores, dispositivos hechos con semiconductores. El nombre de estos materiales proviene de que pueden ser o no ser conductores de la electricidad, de acuerdo con la forma que los pongamos en operación y esta propiedad es de naturaleza cuántica. La electrónica actual y el creciente empleo de la fotónica están fundados en el conocimiento del mundo cuántico por lo que su divulgación es indispensable para comprender el mundo en que vivimos.

5. Hacia el futuro

Con lo aquí dicho puede afirmarse que la física de siglo XXI estará fundada en los principios cuánticos. Sin embargo el camino por recorrer no es todavía muy claro pues muchos piensan que la mecánica cuántica está por entenderse. En términos generales esta posición es correcta ya que esa teoría, como todo conocimiento científico, no es definitiva y queda mucho por comprender de su significado profundo. Empero el endurecimiento de esa posición sólo ocultaría que lo que ya entendemos de ella nos compromete y obliga a cambiar mucho de lo que hemos creído acerca del comportamiento de los fenómenos naturales. Parece ya claro que la mayor aportación del conocimiento cuántico proviene no tanto de los extraños fenómenos que lo originaron sino de las insólitas consecuencias que de él se derivan.

Es obvio que muy poco puede decirse acerca de la evolución futura del conocimiento cuántico. Sin embargo los acontecimientos recientes nos permiten prever que su crecimiento mayor no será tanto en extensión cuanto en profundidad. Un revisión del desarrollo de la física cuántica, por superficial que sea, muestra que los aparentes defectos de sus explicaciones, que inicialmente fueron considerados como paradojas, han sido aclarados en la mayoría de los casos al tomarlos como manifestaciones de rasgos propios del comportamiento de la naturaleza. Así los físicos han convertido muchas de las llamadas “paradojas” en “efectos cuánticos”. A continuación describiremos los más famosos: el gato de Schrödinger y el enmarañamiento de partículas.

En 1935 Schrödinger planteó una situación de apariencia paradójica: en una caja que contiene una fuente radiactiva, un detector para registrar y usar la emisión de tal fuente, y una botella de vidrio conteniendo un gas venenoso, se encierra un gato, y todo se ajusta para que haya una probabilidad del 50% de que la fuente se desintegre. De acuerdo con la mecánica cuántica la situación de la caja es que en su interior hay una fuente que se ha desintegrado y que todavía no lo hace, un frasco que está roto y no roto, y un gato vivo y muerto. Durante mucho tiempo numerosos científicos sostuvieron que eso era inaceptable y que mostraba una gran defecto de la teoría cuántica. La mayor inquietud

estuvo en la situación del gato ya que, aparte del natural afecto que sentimos por esos animales, había que aclarar si ellos estaban sujetos a las leyes cuánticas. El gato de Schrödinger es en la actualidad una buena metáfora para exhibir el principio de superposición de estados, que fundamenta la mecánica cuántica y su aplicación a los objetos de la vida cotidiana es una de las esperanzas para la construcción de computadoras “cuánticas”.

El otro acertijo fue planteado también en 1935 y su principal autor fue un indiscutible precursor de la física cuántica: Albert Einstein. Este físico, ayudado por sus colegas Boris Podolsky y Nathan Rosen, cuestionó a la comunidad científica acerca de la completez de la descripción cuántica con un problema que a partir de su publicación fue conocido como “la paradoja EPR”. Este consiste en poner en movimiento a dos partículas idénticas en sentidos opuestos con velocidades iguales, y cuando ellas se han separado mucho determinar el estado de movimiento de una, con el propósito de saber del estado de la otra. De acuerdo con la mecánica cuántica la situación de esta última dependerá del proceso de medición de la primera, aunque aparentemente ella no haya sido observada. Muchos científicos tomaron la paradoja EPR como evidencia de una interpretación defectuosa de la mecánica cuántica argumentando que ninguna definición razonable de “realidad” permitiría eso.

En 1982, en un laboratorio de óptica francés, el físico Alain Aspect ayudado por otros colegas, realizó lo que planteaba el problema de Einstein mostrando que pueden producirse partículas en estados enmarañados, esto es, cuerpos en estados relacionados de tal manera que la manipulación de uno de ellos afecta la situación de otro distante, sin que medie la transmisión de una señal que informe acerca de tal manipulación. El experimento de Aspect fue realizado produciendo un par de fotones que viajaron rápidamente en direcciones opuestas y analizando los efectos en uno de ellos causados por la observación del otro. Ahora sabemos de la existencia de correlaciones entre sistemas de partículas causadas por la naturaleza de su producción, las cuales se conservan mientras no se perturbe al sistema y se manifiestan al hacerlo, aunque la separación de las partículas sea muy grande.

Como en nuestra época se busca de inmediato el uso del conocimiento científico, hay en estos momentos mucha actividad para emplear el fenómeno de enmarañamiento de partículas y se espera pronto disponer, además de la computación, de la criptografía y de la teleportación cuánticas. Como es sabido, con la criptografía se busca asegurar el secreto en las comunicaciones, y la mecánica cuántica ofrece la posibilidad de lograrlo destruyendo la información en el caso de que alguien intentara obtenerla sin conocimiento de su destinatario. Con la teleportación cuántica esperamos llevar objetos –preferentemente personas– de un lugar a otro muy distante “recreándolos” en su destino, con el consiguiente ahorro de tiempo y uso de vehículos pesados como los que ahora empleamos. Ya se afirma que las paradojas aparecidas en los inicios de la mecánica cuántica son ahora la base de la tecnología del futuro.

Empero hay algo muy importante que enfatizar en toda celebración del centenario de la física cuántica y es que ésta es un logro del esfuerzo humano por saber. Nunca sobraría subrayar que la ciencia es un conocimiento y que éste se está ampliando y profundizando en forma insospechada gracias al descubrimiento y comprensión de los fenómenos cuánticos. Por lo tanto, un buen final para este artículo es recordar la máxima del profesor John Archibald Wheeler, otro de los grandes constructores de la física cuántica, que reza así: *Comprenderemos lo simple que es el Universo cuando aceptemos lo extraño que es.*

100 años de física cuántica

Luis Estrada

Hace un siglo, el 14 de diciembre de 1900, en una conferencia impartida por el profesor Max Planck en la sociedad de física de Berlín, se habló por primera vez de la física cuántica. En esa ocasión Planck dio a conocer una buena forma de describir el comportamiento del color de la luz producida por un cuerpo caliente. Este fenómeno no nos es totalmente desconocido pues sabemos por experiencia que si calentamos un pedazo de hierro éste se hace luminoso –tanto más brillante cuanto más caliente– y que su luz, como la solar, está compuesta por una extensa gama de colores que nos recuerda al arco iris. ¿Por qué sucede eso?

Para precisar el color de una luz se le asigna una cantidad llamada frecuencia. Cuando la luz pasa del rojo al amarillo y luego al violeta la frecuencia crece. Si seguimos aumentando la frecuencia, la luz se hará invisible para nuestros ojos y diremos que se trata de luz ultravioleta. El crecimiento de la frecuencia nos conducirá a otras luces: los rayos X y los llamados “gamma”. La organización de las luces en términos de sus frecuencias constituye el espectro electromagnético y la teoría correspondiente ya estaba firmemente establecida cuando Planck realizaba sus estudios. Sin embargo, su aplicación a la emisión de luz por un cuerpo caliente predecía algo absurdo: el aumento de temperatura haría crecer sin límite la frecuencia.

Planck, quien nació en Alemania en 1858 (murió en 1947), se había doctorado en la Universidad de Munich en 1879 y especializado en termodinámica, esto es, en el estudio de las propiedades de la materia relacionadas con las condiciones a las que está sujeta, en especial su temperatura. Una característica esencial del estudio termodinámico es que puede tratar un objeto sin necesidad de detallarlo demasiado y por ello podemos saber mucho del comportamiento de un gas sin tomar en cuenta que está hecho de partículas. Sin embargo la curiosidad humana es insaciable y hemos construido otras disciplinas que extienden y profundizan nuestros conocimientos. Desde fines del siglo pasado se sabía cómo usar la mecánica para explicar las conclusiones de los estudios termodinámicos en términos de las componentes básicas del objeto en consideración, por ejemplo la presión que ejerce un gas como resultado de que está hecho de partículas.

Volvamos al pedazo de hierro con el que iniciamos este artículo y pensemos en su calentamiento. Si tal objeto tuviera una cavidad interna –una burbuja que quedó atrapada dentro de él, por ejemplo– al calentarlo la luz emitida en su interior llenaría la cavidad y entonces tendríamos una especie de frasco repleto de luz. No es extraño entonces estudiar la luz como un gas y preguntarse acerca de sus componentes. Antes de continuar es preciso señalar algo que podría parecer paradójico: un buen emisor puede ser también un gran absorbente, esto es, los objetos luminosísimos son la otra cara de los hoyos negros. Esto es claro si se piensa que una cavidad repleta de luz podría dejar escapar un haz de gran luminosidad, mientras que la misma cavidad, cuando está totalmente vacía, guardaría toda la luz que entrara en ella. De ahí que los físicos se refieran al trabajo de Planck como el estudio de “la radiación del cuerpo negro”.

Los cimientos

Para construir la fórmula matemática que describe la distribución por frecuencias de la luz emitida por un cuerpo caliente –un cuerpo negro–, Planck tuvo que suponer que la luz y la materia no intercambian energía en cantidades cualesquiera, como se había pensado hasta entonces, sino sólo en múltiplos enteros de una cantidad mínima posible, un *quantum* (*cuanto*) de energía. Con esto Planck abrió un nuevo camino que pronto permitiría empezar a entender una gran cantidad de fenómenos que ahora se califican como cuánticos. Sin embargo, como ha sucedido con otros grandes descubrimientos, Planck no pudo comprender lo que había encontrado y confesó que había supuesto la existencia de “paquetes discretos” de energía en un momento de desesperación al no encontrar otra manera para describir la radiación del cuerpo negro.

Albert Einstein, el más célebre físico del siglo XX, principalmente por sus teorías de la relatividad, fue uno de los primeros en aprovechar la hipótesis de Planck. En 1905 publicó una explicación del efecto fotoeléctrico –la producción de electricidad por la incidencia de luz en metales– por la que

años después le fue otorgado el Premio Nobel de física. Einstein consideró la luz como un gas formado por un gran número de partículas cuyas energías seguían el comportamiento de los *quanta* (*cuantos*) de Planck y explicó el efecto fotoeléctrico como el resultado de la incidencia de las partículas de luz sobre los electrones del metal. Los electrones habían sido descubiertos ocho años antes por el físico inglés Joseph John Thomson. Ahora sabemos que la luz y la electricidad tienen estructura granular: la luz se compone de partículas llamadas fotones y la electricidad de electrones.

Durante los siglos XVIII y XIX, la teoría atómica de la materia se desarrolló mucho, especialmente por los esfuerzos de científicos como Daniel Bernoulli, John Dalton y Amadeo Avogadro. Sin embargo, todavía a fines del siglo XIX su aceptación era muy reducida, incluso entre los físicos. Los descubrimientos de Planck y Einstein cambiaron esa situación, además de poner los cimientos para la construcción de la teoría atómica actual de la materia.

La construcción del edificio

Aunque se afirma que la física cuántica nació con el descubrimiento de Planck, en 1900, lo cierto es que su formulación se inició hasta 1925, con los trabajos de otro físico alemán, Werner Heisenberg. Es indudable que la mecánica cuántica, como casi todas las teorías científicas modernas, es una obra colectiva resultante de una gran variedad de esfuerzos personales realizados durante muchos años y en diversos lugares. Sin embargo, buscando los antecedentes determinantes de lo que ahora sabemos de ese campo, es imposible pasar por alto un artículo –fechado en 1925– en el que Heisenberg señaló la importancia de cambiar la formulación matemática de los fenómenos que ocurren en el mundo atómico.

A partir de 1926, el desarrollo de la mecánica cuántica fue espectacular. En ese año Erwin Schrödinger (físico austriaco) formuló la famosa ecuación que desde entonces lleva su nombre y con ella los físicos iniciaron la construcción del gran edificio que alberga ahora a las explicaciones de los fenómenos atómicos y moleculares. Poco después se puso en limpio la estructura matemática de la teoría cuántica, especialmente por los trabajos del físico inglés Paul Adrien Maurice Dirac y del matemático norteamericano, de origen húngaro, John von Neumann. Los logros de la mecánica cuántica fueron tantos que enumerarlos llenaría esta revista. Sin embargo no todo era miel sobre hojuelas pues la lista de problemas pendientes también fue creciendo.

Cuando un conjunto de átomos es sometido a una acción externa –un calentamiento o el paso de una corriente eléctrica– estos emiten radiación electromagnética, por ejemplo luz. El caso del hidrógeno gaseoso fue el favorito en los laboratorios de física por lo que el arreglo de las líneas luminosas que emite –su espectro– constituyó una especie de modelo para el estudio de la emisión atómica. No obstante en 1947 el físico norteamericano Willis Lamb, aprovechando las técnicas para el manejo de microondas desarrolladas durante la segunda guerra mundial, descubrió algo inesperado: una de las líneas luminosas del hidrógeno era compuesta y podía separarse en dos, lo que se pensaba era imposible de acuerdo con la teoría aceptada en esos momentos. Unos cuantos meses después los norteamericanos Julian Schwinger y Richard Feynman publicaron una reformulación de la mecánica cuántica con la cual se podía explicar –y calcular– la separación de líneas descubierta por Lamb. El desarrollo de la física cuántica ha continuado hasta nuestros días y no es éste el lugar para seguir esbozando su historia.

¿Qué es la Física cuántica?

La naturaleza atómica de la materia es algo ahora aceptado. Sin embargo, la comprensión del mundo microscópico entraña muchas dificultades, ya que el comportamiento de sus componentes es muy diferente al de los que conforman el mundo de la vida cotidiana. Para explicar ese comportamiento fue necesario construir la física cuántica. Lo común es pensar que al aceptar que la materia tiene una estructura atómica se acepta también que toda sustancia está compuesta por partes irreducibles –átomos en su sentido literal– y que éstas son las partículas estudiadas en la mecánica newtoniana. Lo primero es correcto pero lo segundo no, ya que suponer que toda sustancia está compuesta por partículas puntuales conduce a predicciones falsas como las que tuvo que enfrentar Planck al estudiar la radiación del cuerpo negro. Veamos por qué.

Cuando un haz luminoso incide en un vidrio parte de él lo atraviesa y la otra parte se refleja. Si consideramos que la luz está formada por fotones explicaríamos la experiencia anterior diciendo que la superficie del vidrio admite que algunos fotones sigan su camino y que otros boten y regresen. La

aceptación de la estructura atómica obliga a responder qué sucede a cada componente por lo que cabe preguntarse qué sucedería si incide un sólo fotón en la superficie del vidrio; ¿el fotón pasa o se regresa? Antes de tener una respuesta surge, inevitablemente, otra pregunta: ¿el fotón es una partícula puntual?

Para estudiar el comportamiento de los fotones la mecánica cuántica no empieza presuponiendo que tienen una forma específica, pues la noción de partícula que esa teoría ha elaborado es muy flexible y ajustable. Ese comportamiento se define en relación con el tipo de observación o experimento en el que intervendrá la partícula y ésta puede ser imaginada con modelos de la física clásica: una partícula o una onda. Así, cuando se trata de determinar imágenes formadas por cuerpos luminosos, como las estrellas, se emplea la noción de “rayo de luz”, trayectoria análoga a la que seguiría una partícula de las tratadas en los libros de mecánica newtoniana. Si para estudiar el mismo cuerpo se hace que la luz que emite provoque un efecto de interferencia, convendrá emplear la noción de onda luminosa, aunque el detector de luz sea un contador de fotones. Esto hace que muchos hablen de la “dualidad partícula-onda” cuando explican los fenómenos luminosos.

La mecánica cuántica describe el comportamiento del fotón que incide en la superficie de un vidrio afirmando que se trata de un asunto de probabilidad: el fotón puede atravesar el vidrio o reflejarse de acuerdo con las propiedades de transparencia y reflectividad del vidrio. Suponiendo que éstas sean en alguna forma igualmente posibles, la probabilidad de transmisión y de reflexión será la misma, esto es el 50%. Lo que hay que subrayar es que el fotón pasa o no pasa, es decir, no pierde su individualidad. Esta forma de explicación ilustra una de las características básicas de la física cuántica: sólo da probabilidades y no las certezas a las que nos había acostumbrado la física clásica. En la física cuántica la probabilidad entra como un elemento fundamental e irreducible de la descripción de la naturaleza. En el ejemplo anterior no podemos decir si un fotón determinado pasará o no pasará hasta que no lo hallamos observado y esto no se debe a que nos falte información, sino a que hemos aprendido que así es su comportamiento.

Lo dicho para los fotones –los “átomos” de luz– es válido para todas las partículas microscópicas. Los electrones, los protones y los neutrones, por ejemplo, se comportan a veces como ondas y a veces como partículas. Por eso los electrones pueden interferir y difractarse como los fotones cuando manifiestan su naturaleza ondulatoria, o bien seguir trayectorias determinadas cuando exhiben el comportamiento de partículas. Pero aunque la descripción cuántica de las partículas parezca vaga ha sido de una utilidad asombrosa. La mecánica cuántica nos ha permitido explicar en “forma atómica” fenómenos que a primera vista no parecerían admitir tal tipo de explicación. Un ejemplo es describir la transmisión del sonido en una red cristalina como el paso de un haz de partículas llamadas fonones. De esta manera se explican ahora, en forma análoga a la propagación de la luz, las propiedades de la conducción del calor en muchos materiales sólidos.

Hay muchas más particularidades de la física cuántica que nos están ayudando a entender los fenómenos del mundo microscópico y no hay lugar aquí para siquiera enumerarlos. Sin embargo es imposible no mencionar algo que esa teoría nos ha mostrado: toda observación altera lo observado.

Para ejemplificar este hecho se suele referir que para observar la posición de un electrón es preciso hacer incidir sobre él por lo menos un fotón y que esta interacción alterará la posición de esta partícula. En las palabras de uno de los creadores de la física cuántica, el profesor Dirac, *la fineza de nuestra capacidad para observar y la disminución de la perturbación ocasionada por esa acción tienen un límite, el cual es inherente a la naturaleza de las cosas*. El descubrimiento de que toda observación altera lo observado ha tenido consecuencias muy importantes en la construcción de la ciencia actual pues, como bien sabemos, la misma está basada en la observación de la naturaleza.

La física cuántica hoy

Entre los logros más difundidos de la teoría cuántica está la física atómica moderna, disciplina que explica las propiedades de las componentes básicas de los elementos químicos. Así sabemos, por ejemplo, que el helio es un gas cuyos átomos están formados por dos electrones unidos por una fuerza eléctrica producida por un núcleo muy pesado. Las propiedades de este elemento pueden explicarse satisfactoriamente en términos de la teoría cuántica, tanto en forma cualitativa como cuantitativa. Esa misma teoría nos ha permitido construir la física nuclear, que explica cómo está formado el núcleo atómico y por qué tiene las propiedades que lo caracterizan. En el caso del helio esta disciplina también ha diluci-

dado por qué es tan pesado su núcleo y por qué su forma natural es estable. Sabemos asimismo que los protones y neutrones que componen los núcleos atómicos están a su vez compuestos por otras partículas y que sus propiedades pueden describirse en términos cuánticos. Todo lo que hemos aprendido del mundo microscópico está ahora escrito en el lenguaje de la física cuántica.

En el otro extremo, el de lo grande del Universo, el conocimiento cuántico es también esencial. La vida de las estrellas y la formación de los elementos durante la evolución del Universo requieren del saber cuántico para su explicación. Más aún, el conocimiento de los primeros momentos de la existencia del Universo ha sido elaborado gracias al desarrollo de la física cuántica. La “forma” del Universo y la especulación acerca de su futuro son también temas que requieren de la física cuántica, aunque en este caso la aportación de esta teoría es todavía incipiente pues no contamos aún con una explicación cuántica de los fenómenos gravitatorios. Acerca de esto último cabe mencionar que hay ideas atractivas y promisorias que animan mucho la investigación en ese campo y que nos dan esperanza de extender con buen éxito nuestro conocimiento y confiar en que pronto dispondremos de una “teoría cuántica de la gravitación”.

En la vida cotidiana la presencia del conocimiento cuántico es cada día mayor aunque todavía encubierta. La comunicación mediante satélites y teléfonos celulares, las computadoras y los lectores de discos compactos y códigos de barras emplean “circuitos integrados” –*chips*– para su funcionamiento, los cuales están formados por transistores, dispositivos hechos con semiconductores. El nombre de estos últimos proviene de que pueden ser o no ser conductores de la electricidad, de acuerdo con la forma que los pongamos en operación y esta propiedad es de naturaleza cuántica. La electrónica actual y el creciente empleo de la fotónica –que usa la luz como base del funcionamiento de sus aparatos– están fundados en el conocimiento del mundo cuántico por lo que su divulgación es indispensable para comprender el mundo en que vivimos.

Hacia el futuro

Con lo aquí dicho puede afirmarse que la física de siglo XXI estará fundada en los principios cuánticos. Sin embargo el camino por recorrer no es todavía muy claro ya que muchos piensan que todavía no hemos entendido cabalmente los fundamentos de la mecánica cuántica. En términos generales esta posición es correcta ya que esa teoría, como todo conocimiento científico, no es definitiva y queda mucho por comprender de su significado profundo. Empero el endurecimiento de esa posición sólo ocultaría que lo que ya entendemos de ella nos compromete y obliga a cambiar mucho de lo que hemos creído acerca del comportamiento de los fenómenos naturales. Parece claro ahora que la mayor aportación del conocimiento cuántico proviene no tanto de los extraños fenómenos que lo originaron sino de las insólitas consecuencias que de él se derivan.

Es obvio que muy poco puede decirse acerca de la evolución futura del conocimiento cuántico. Sin embargo los acontecimientos recientes nos permiten prever que su crecimiento mayor no será tanto en extensión cuanto en profundidad. Un revisión del desarrollo de la física cuántica, por superficial que sea, muestra que los aparentes defectos de sus explicaciones, que inicialmente fueron considerados como paradojas, han sido aclarados en la mayoría de los casos al tomarlos como manifestaciones de rasgos propios del comportamiento de la naturaleza. Así los físicos han convertido muchas de las llamadas “paradojas” en “efectos cuánticos”. A continuación describiremos los más famosos: el gato de Schrödinger y el enmarañamiento de partículas.

En 1935 Schrödinger planteó una situación de apariencia paradójica: se mete un gato en una caja cerrada, en la cual hay además un dispositivo compuesto por un átomo radiactivo con una probabilidad de 50 % de desintegrarse, un aparato que detecta la desintegración del átomo y una botella de veneno que se romperá al producirse la desintegración. Desde el punto de vista cuántico, antes de abrir la caja y comprobar que el átomo se desintegró y el gato está muerto –o que no se desintegró y el gato está vivo– todos los elementos de este aparato se encuentran en una *superposición de estados*. Así en su interior hay una fuente que se ha desintegrado y que no se ha desintegrado, un frasco que está roto y no roto, y un gato vivo y muerto. Durante mucho tiempo numerosos científicos sostuvieron que eso era inaceptable y que mostraba una gran defacto de la teoría cuántica. La mayor inquietud estuvo en la situación del gato ya que, aparte del natural afecto que sentimos por esos animales, había que aclarar si ellos estaban sujetos a las leyes cuánticas. El gato de Schrödinger es en la actualidad una buena metáfo-

ra para exhibir el principio de superposición de estados, que fundamenta la mecánica cuántica y su aplicación a los objetos de la vida cotidiana es una de las esperanzas para la construcción de computadoras "cuánticas".

El otro acertijo fue planteado también en 1935 y su principal autor fue un indiscutible precursor de la física cuántica: Albert Einstein. Este físico, ayudado por sus colegas Boris Podolsky y Nathan Rosen, cuestionó a la comunidad científica acerca de la completez de la descripción cuántica con un problema que a partir de su publicación fue conocido como "la paradoja EPR". Para ello formuló el siguiente escenario: Se emiten dos partículas idénticas que viajan en sentidos opuestos con velocidades iguales y se deja pasar un tiempo suficiente como para que se separen mucho. Luego se efectúa una determinación del estado de una de ellas con el propósito de conocer el estado de la otra. De acuerdo con la mecánica cuántica la situación de esta última depende del proceso de medición de la primera, aunque ella no haya sido observada. Muchos científicos tomaron la paradoja EPR como evidencia de una interpretación defectuosa de la mecánica cuántica argumentando que ninguna definición razonable de "realidad" permitiría eso.

En 1982, en un laboratorio de óptica francés, el físico Alain Aspect ayudado por otros colegas, realizó lo que planteaba el problema de Einstein mostrando que pueden producirse partículas en estados *enmarañados*, esto es, cuerpos en estados relacionados de tal manera que la manipulación de uno de ellos afecta la situación de otro distante, sin que medie la transmisión de una señal que informe acerca de tal manipulación. El experimento de Aspect fue realizado produciendo un par de fotones que viajaron en direcciones opuestas y analizando los efectos en uno de ellos causados por la observación del otro. Ahora sabemos de la existencia de correlaciones entre sistemas de partículas causadas por la naturaleza de su producción, las cuales se conservan mientras no se perturbe al sistema y se manifiestan al hacerlo, aunque la separación de las partículas sea muy grande.

Como en nuestra época se busca de inmediato el uso del conocimiento científico, hay en estos momentos mucha actividad para emplear el fenómeno de enmarañamiento de partículas y se espera pronto disponer, además de la computación, de la criptografía y de la teleportación cuánticas. Sabemos que con la criptografía se busca asegurar el secreto en las comunicaciones, y la mecánica cuántica ofrece la posibilidad de lograrlo destruyendo la información en el caso de que alguien intentara obtenerla sin conocimiento de su destinatario. Con la teleportación cuántica esperamos llevar objetos – preferentemente personas – de un lugar a otro muy distante "recreándolos" en su destino, con el consiguiente ahorro de tiempo y uso de vehículos pesados como los que ahora empleamos. Ya se afirma que las paradojas aparecidas en los inicios de la mecánica cuántica son la base de la tecnología del futuro.

Hay algo muy importante que enfatizar en toda celebración del centenario de la física cuántica y es que ésta es un logro del esfuerzo humano por saber. Nunca sobraría subrayar que la ciencia es un conocimiento y que éste se está ampliando y profundizando en forma insospechada gracias al descubrimiento y comprensión de los fenómenos cuánticos. Por lo tanto, un buen final para este artículo es recordar la máxima del profesor John Archibald Wheeler, otro de los grandes constructores de la física cuántica, que reza así: *Comprenderemos lo simple que es el Universo cuando aceptemos lo extraño que es.*