



¿Por qué 2005 se declaró Año Mundial de la Física?

LUIS DE LA PEÑA*

** Doctor en Ciencias Físico-matemáticas por la Universidad Estatal Lomonósov. Es investigador emérito del Instituto de Física, Catedrático de la UNAM e Investigador Nacional Emérito. Su área de trabajo de investigación es la física teórica, con énfasis en los fundamentos de la mecánica cuántica y en teoría de procesos estocásticos. Obtuvo el Premio Universidad Nacional en Investigación en Ciencias Exactas, en 1989 y en 2002 el Premio Nacional de Ciencias y Artes, en la rama de Ciencias Físicas y Naturales.*

En 1955 se celebró internacionalmente el quincuagésimo aniversario de la Teoría de la Relatividad. Albert Einstein, un joven físico totalmente desconocido, alemán pero residente en Suiza y que, para mayor sorpresa, no tenía cargo alguno de investigador, en junio de 1905 envió para su publicación el trabajo que dio nacimiento a esta teoría. El viejo Einstein, quien murió en abril de 1955, no alcanzó a estar presente en los festejos que la comunidad científica mundial le organizara a él y a su obra. Años más tarde, en 1979, esta misma comunidad celebró el primer centenario del nacimiento de Einstein. Ahora el motivo es el primer centenario de la publicación de sus espléndidos trabajos de 1905. Si bien no es usual que la colectividad científica celebre a uno de sus miembros con tal frecuencia, hay razones para hacerlo y vale la pena platicar un poco de ellas.

La conmemoración internacional de 2005 tiene varios fines. Uno, el más inmediato, es promover el interés por la física y atraer hacia ella al mayor número posible de jóvenes inquisitivos e inquietos. Otro es contribuir a combatir el desinterés e incluso la hostilidad hacia la ciencia que se da en algunos sectores desinformados o mal informados de la sociedad, proporcionándoles una visión amplia y equilibrada de los beneficios que la sociedad en general ha obtenido como fruto de la actividad científica. En la actualidad esto es particularmente importante para el país dada

la falta de atención hacia la ciencia mostrada por nuestros gobernantes, política (o más bien, falta de política) que contribuye a mantenernos en el atraso y la dependencia tecnológica, económica y cultural. En todo el mundo la figura de Einstein ejerce gran atractivo sobre la sociedad, que reconoce en él a uno de los mejores exponentes de aquellos grandes valores humanos que deben ser transmitidos a las nuevas generaciones e inculcados entre sus miembros. Usar la oportunidad del centenario de sus trabajos de 1905, ligado a la enorme popularidad de esta figura universal, es seguramente la forma de homenaje que más le hubiera gustado al viejo Einstein: no una fiesta para ensalzarlo sino un acto para difundir y hacer avanzar la ciencia.

Detengámonos primero brevemente en aquellos trabajos cuyo centenario se está conmemorando. Albert Einstein escribió en 1905 cinco artículos de investigación, de los cuales cuatro se publicaron ese mismo año. Con aquellos trabajos el joven científico eventual inventa,¹ crea o descubre, como prefera verse,² tres nuevas teorías físicas que tendrán gran repercusión y abren sendos capítulos de la física. Una, ya lo hemos dicho, es la teoría de la relatividad, otra la teoría del movimiento browniano y, finalmente, la teoría fotónica de la luz —aunque no es éste el nombre que Einstein diera a su descubrimiento. En cada uno de estos casos se trata de teorías nuevas de gran envergadura, que nos revelan aspectos del mundo físico previamente desconocidos.





La teoría de la relatividad

Dos de los trabajos publicados en 1905 por Einstein están dedicados a la teoría de la relatividad. Con el primero de ellos nace esta teoría. Se trata de un trabajo en el que su joven autor se propone resolver un problema y lo hace de manera insólita y profunda. A principios del siglo XX, cuando Einstein preparó este artículo, tanto la mecánica clásica (la mecánica basada en las viejas leyes de Newton) como la teoría electromagnética (la teoría general de los fenómenos eléctricos y magnéticos) estaban ya consolidadas como teorías físicas. Aunque se trata de teorías que se refieren a fenómenos muy diferentes hay un punto en que se dan la mano, pues su combinación permite estudiar el movimiento de los cuerpos electrizados (o magnetizados) en el seno de campos eléctricos y magnéticos. Einstein observó que, pese a todo, pueden aparecer problemas cuando se combinan ambas teorías. Esto lo podemos ver con el siguiente ejemplo simple. La velocidad de la luz en un medio está determinada por ciertas propiedades de éste. Por ejemplo, la luz se propaga con mayor rapidez en el vacío que en el aire o en el agua. De aquí sigue que la velocidad de propagación de la luz en el vacío está determinada en forma directa por propiedades del espacio. Eso significa que un rayo de luz viaja en el vacío con la *misma* velocidad, cualquiera que sea la velocidad con que se mueva la fuente de la que emana. Por ejemplo, la luz emitida por la lámpara frontal de un ferrocarril que viene hacia nosotros nos llega con la misma velocidad con la que la recibiríamos si el ferrocarril estuviera en reposo. No se le suman los, digamos, 250 km/h con que se nos acerca el ferrocarril. Esta observación está en abierta contradicción con las leyes de la mecánica, según la cual sí deberían sumársele esos 250 km/h. De observaciones de esta naturaleza concluyó Einstein la necesidad de revisar a profundidad los conceptos de espacio y tiempo (básicos para determinar las velocidades) como se les usan en la mecánica clásica. Y de tal revisión surgió la teoría de la relatividad.

Lo que acabamos de decir nos prepara para esperar que la teoría de la relatividad nos depare sorpresas. En efecto, si las dos velocidades, la del

tren y la de la luz, no se suman sino que siempre nos darán como resultado la misma velocidad (la de la luz), cosas extrañas sucederán según esta teoría. Y sí, en efecto, suceden. Por ejemplo, resultará que las dimensiones de un cuerpo dependen de su estado de movimiento, igual que sucede con la marcha de los relojes, y así sucesivamente. Pronto descubrió Einstein todo esto, pero también otra cosa tan inesperada como las anteriores: que también la masa (inercial) de un cuerpo depende de su estado de movimiento. Lo que sucede es que la teoría predice que la masa que posee un cuerpo está determinada por su energía. Ésta es la famosísima relación de Einstein $E=mc^2$, cuya demostración es el tema de que se ocupa en el segundo trabajo sobre la relatividad que publicó en 1905 y que, además de su gran importancia científica, ha dado lugar a muy importantes aplicaciones tecnológicas. Esta ley nos dice de manera precisa cuánto vale la masa m de un cuerpo que contiene la energía E , con c la velocidad de la luz. Por ejemplo, al lanzar una pelota le damos energía adicional (le agregamos la debida a su movimiento). Según la fórmula de Einstein esto significa que crece su masa, y que entre mayor velocidad le imprimamos a la pelota, mayor será su masa. Para las velocidades con que se mueven realmente las pelotas el efecto es totalmente despreciable; por eso no lo notamos en condiciones ordinarias. Pero si lanzáramos la pelota a una velocidad muy cercana a la de la luz, las cosas serían muy diferentes, pues la masa crecería a valores enormes. Por ejemplo, la masa de un cuerpo se duplica a una velocidad de 87% de la de la luz, y cuando se le imprime una velocidad de 99% de la de la luz, crece más de siete veces. A la velocidad de la luz la masa sería infinita; pero como tal masa no se puede dar (no hay suficiente masa para ello en el universo), resulta imposible acelerar ningún cuerpo hasta la velocidad de la luz. Es así como ésta aparece en la relatividad como la velocidad límite, inalcanzable, de los cuerpos.

La relación entre masa y energía es sorprendente, pues dice que masa y energía son convertibles una en la otra. Como la velocidad de la luz es enorme (300 millones de metros cada segundo), resulta que un poquito de masa contiene una cantidad abrumadora de energía. Disponer





Fragmento de la serie Este - Oeste Berlín

de esta ley ha permitido a los físicos entender y hacer muchas cosas. Por ejemplo, con ella se ha explicado el origen de la inmensa energía de que dispone el Sol, que constantemente derrama al espacio en cantidades enormes y, en apariencia, no se le agotan las reservas. Simplemente sucede que una mínima parte de la masa de los núcleos de sus átomos se está transformando de manera constante en energía a través de una cadena de reacciones nucleares que transforman hidrógeno en helio (éstos son los elementos químicos más ligeros). Otro tipo de reacción nuclear, con la diferencia de que ésta involucra núcleos muy pesados de uranio, pero en la que también se transforma masa en energía, es la que se utiliza en los reactores nucleares para producir calor, que es transformado en energía eléctrica en la misma instalación.

Pronto Einstein se dio a la tarea de generalizar su teoría para ponerla en condiciones de describir ese otro fenómeno fundamental de la naturaleza que es la gravitación. Cumplir con este programa le llevó alrededor de diez años, pues resultó muy complejo. La teoría resultante, es decir, la Teoría General de la Relatividad, su obra suprema y que fuera calificada por Max Born, otro gran físico teórico, como la mayor proeza de la reflexión del hombre sobre la naturaleza es, en efecto, una teoría de la gravitación. Esta teoría se distingue del resto de las teorías físicas en que en ella la geometría del espacio no se fija *a priori*, de entrada, sino que queda determinada en cada caso por la propia teoría. A esto se refiere uno cuando habla de la curvatura del espacio y del tiempo, con lo que se está diciendo que la geometría que resulta no es la euclídea, que es la que aprendemos en la escuela.

La estructura de la luz

En otro de sus trabajos de 1905 Einstein se ocupó de un problema por completo diferente, esta vez relativo a los procesos en que se absorbe o emite luz. Es claro que éste es un viejo tema y en la física clásica se le trata con detenimiento. El punto está en que avanzado el siglo XIX se observaron nuevos aspectos de él que no pudieron ser explicados por la física de su tiempo, es decir, la física clásica. Este



problema fue abordado en 1900 por Max Planck, quien llegó a una conclusión sorprendente y totalmente inesperada: la materia emite luz, es decir, radiación electromagnética, sólo en ciertas porciones, cada una con energía perfectamente definida.³ Éste fue un descubrimiento desconcertante, que representa el nacimiento de la física cuántica, pues nuestra experiencia habitual (y la física clásica) nos conduce a pensar que se puede emitir cualquier cantidad de luz. La idea de emisión de luz en cantidades discretas sonaba tan descabellada que al propio Planck le parecía altamente sospechosa, por lo que hizo esfuerzos serios y persistentes para desecharla. Pero no tuvo éxito y se vio precisado a dejar ahí las cosas, sin que nadie más se animara a retomar el problema hasta que Einstein lo hizo en 1905, con su característica creatividad.

Al analizar con detenimiento varios problemas en que participan la luz y átomos que la absorben o la emiten, Einstein llegó a la conclusión de que en realidad las energías discretas se dan en todos los casos, tanto en la absorción como en la emisión, y no sólo durante la emisión como había concluido Planck. Esto le hizo pensar en una hipótesis todavía más audaz que la de Planck: si en todos los casos la luz se presenta en paquetes de energía definida, lo más natural es suponer que es la radiación misma la que viene en paquetes. Estos paquetes de energía definida, en que según esta hipótesis está estructurada la luz, se conocen en la actualidad como *fotones*. Así, los fotones son los cuantos de luz.

Einstein analizó varios otros problemas desde la nueva perspectiva ofrecida por su teoría y mostró que las dificultades conocidas se disolvían. Pese a ello la propuesta resultaba tan extraña que tardó muchos años en ser aceptada. Hoy la situación es precisamente la opuesta, pues la idea de los fotones ha resultado tan valiosa que no sólo se le utiliza en todo tratamiento que tenga que ver con el intercambio de energía entre el campo electromagnético y la materia a escala atómica, sino que se le ha generalizado. En la física moderna se considera que todos los campos, y no sólo el electromagnético, están cuantizados. Esto es parte integral y fundamental de la actual teoría cuántica. En realidad, una vez rebasada la etapa hostil inicial, esta proposición de Einstein se convirtió en algo

tan útil que fue explícitamente citada cuando se le otorgó el premio Nobel (por cierto, hasta 1921, aunque parezca increíble).⁴

El movimiento browniano y la realidad de las moléculas

Nos resta la descripción del primer trabajo que Einstein escribió en 1905, junto con el cual debemos considerar el último artículo publicado ese año, pues ambos se refieren al mismo tema. El primer trabajo se publicó, sin embargo, hasta el siguiente año, por lo que habrá quienes no lo consideren dentro de los trabajos de 1905. El retardo en la publicación de este primer artículo se debió a que el joven Einstein decidió utilizarlo como su tesis doctoral; fue hasta después de aprobada la tesis cuando pudo enviar el artículo para su publicación.⁵ En este par de artículos Einstein trata un tercer problema descubierto por él: considérese un cuerpecillo muy pequeño que se encuentra en suspensión en agua (un buen candidato es un grano de polen o de colorante). En cada momento el granito recibirá el impacto de millones de moléculas del líquido, las que se encuentran en permanente agitación y se mueven en todas las posibles direcciones. Este golpeteo interminable mantiene al granito en permanente agitación, por lo que lo veremos desplazarse de manera errática en el líquido. ¿Qué nos dice este movimiento?

A Einstein le interesó este problema por dos razones. Una inmediata es que en los años comprendidos entre el fin de sus estudios (1900) y 1904 se había dedicado a construir la teoría que debería aplicarse al estudio de los gases, considerándolos compuestos por un número enorme de moléculas.⁶ Al utilizar los resultados de tales estudios, que constituyen lo que hoy conocemos como *mecánica estadística*, Einstein pudo derivar las leyes fundamentales de la termodinámica, es decir, de la teoría del calor. Esto fue muy importante porque daba renovado apoyo a la hipótesis de que los gases están formados por moléculas independientes. Noción que constituía el punto de vista de la llamada *Teoría cinética de los gases*, desarrollada por grandes figuras de la física del siglo XIX como Maxwell y Boltzmann, aunque para entonces no había ad-



quirido aún aceptación universal, como veremos a continuación.

Hoy en día nos puede parecer natural que Einstein adoptara la visión atomista de la materia, pero el caso es que todavía a principios del siglo XX este punto de vista, aunque extendido entre muchos físicos (y químicos), no constituía un conocimiento establecido. Otra parte de los físicos (y químicos), también significativa, estaba convencida de que la noción de átomo era útil, pero que se trataba de entes ficticios, sin realidad física alguna. La vieja hipótesis atómica, propuesta por el químico inglés John Dalton a principios del siglo XIX, dividía a la comunidad de físicos (y químicos) en atomistas y antiatomistas. Ambas corrientes tenían renombrados partidarios y renombrados adversarios. Esta situación se vivió durante todo el siglo XIX y sólo podría resolverse demostrando por medio de la experimentación la existencia de átomos y moléculas. Como no cabía esperar ver un átomo, tendría que buscarse algún método indirecto para lograr este propósito.

Precisamente el concebir el agua como formada por moléculas llevó a Einstein a la observación que acabamos de hacer que el cuerpecillo en suspensión debería estar sujeto a un movimiento azaroso permanente. Vio en esto una forma de poner en evidencia la constitución molecular del agua, por lo que el problema le interesó vivamente; he aquí la mayor razón de su interés inmediato por el tema. Einstein no lo sabía pero el fenómeno había sido observado mucho antes, y como no había sido entendido no se le había dado importancia y ni siquiera se le mencionaba en los textos de la época. En efecto, en 1827 el destacado botánico escocés Robert Brown, el investigador que reconoció que las células poseen regularmente un núcleo, reportó que los granos de polen suspendidos en agua están sujetos a un movimiento azaroso y permanente. Desde entonces hasta Einstein la razón de este movimiento, al que justamente se le llama *browniano*, permaneció en el misterio. Con sus estudios del movimiento browniano Einstein inicia un nuevo capítulo de la física, el de los sistemas que están sujetos a fuerzas que varían al azar y que, por tanto, producen efectos azarosos que sólo pueden estudiarse con métodos estadísticos.⁷

En su trabajo inicial sobre el tema (el escrito en 1905 pero publicado hasta el año siguiente) Einstein dirigió su atención al fondo del problema, es decir, al hecho de que el movimiento browniano nos permite ver el movimiento de las moléculas. Aquí había una vía para demostrar que la materia tiene estructura molecular, y Einstein la recorrió. Pronto demostró que del estudio estadístico del movimiento del granito en suspensión (lo que podía hacerse siguiéndolo atentamente con un microscopio) podían deducirse datos que permitirían calcular, entre otras cosas, el diámetro de las moléculas del agua. Poco tiempo después el físico francés Jean Perrin abordó el problema experimental y para 1909 había ya logrado medir el tamaño de las moléculas del agua. El trabajo de Perrin tuvo enorme éxito, pues con él transformó las moléculas de artículo de fe en entes reales. Uno de los más destacados e irreductibles antiatomistas de la época, fundador de la físico-química, el investigador ruso-alemán Friedrich Ostwald, quedó tan impresionado con estos resultados que no sólo aceptó la realidad de las moléculas sino que propuso a Einstein para el premio Nobel... pero habrían de pasar aún más de diez años para que el Comité Nobel se decidiera.

La actividad pacifista de Einstein

Aunque se trata sin duda de un investigador de creatividad e intuición física excepcionales, sería difícil entender la enorme popularidad y profunda presencia de Einstein en el gran público si éstas fueran sus únicas virtudes. Einstein es más que un científico: es un ser humano ejemplar en muchos sentidos, ciudadano del mundo que aceptó la responsabilidad social inherente a sus actividades e inmenso prestigio y que actuó de manera consecuente con esta responsabilidad. De entre las actividades sociales en que Einstein participó a lo largo de su vida, destacan por su constancia y profundo compromiso las relacionadas con los problemas de la paz, la carrera armamentista y el desarme, en particular el nuclear, y, de manera importante, pero en otra escala, la oposición activa al antisemitismo y al racismo en general.

La vida de Einstein se extendió de 1879 a



1955, por lo que le tocó vivir las dos guerras mundiales (de 1914 a 1918 y de 1939 a 1945). Einstein era alemán por nacimiento y fue su país el iniciador de ambas guerras, hecho del que estuvo plenamente consciente y que lo condujo a hacer llamados y declaraciones frecuentes e insistentes contra el militarismo alemán y por un gobierno democrático. Este tipo de acciones las emprendió desde el inicio de la primera guerra mundial y las continuó hasta su muerte. Sus llamados pacifistas le granjearon la enemistad de amplios sectores de la población alemana, en particular entre los nazis

desastre que significaría la bomba en manos nazis. La única vía a la mano consistía en que los países aliados lograran construir la bomba a tiempo para impedir su uso por parte de Alemania. Ante la gravedad de la situación, Einstein aceptó firmar una carta escrita por Szilard dirigida al presidente Roosevelt, informándole al respecto e instándolo a que se dieran los pasos necesarios para emprender los trabajos de investigación requeridos.

Einstein no participó en ninguna otra forma en la producción de la bomba. Por desgracia la muerte inesperada de Roosevelt dio un giro trágico a la



y sus simpatizantes, lo que, aunado a los odios raciales, llegó a poner en peligro incluso su vida. Finalmente se vio obligado a abandonar Alemania en 1933, para nunca más volver.

Momentos en especial difíciles y amargos en la vida de Einstein se dieron con el desarrollo de la bomba nuclear, la llamada bomba atómica. En el curso de 1939 se hizo claro que Alemania estaba tratando de construir esta bomba; también era claro que de llegar los nazis a disponer de ella, la utilizarían para continuar la oleada de agresiones y anexiones que estaban ya efectuado y que desataron la segunda guerra mundial. Pláticas de Einstein con el físico nuclear húngaro Leo Szilard, quien fuera el descubridor inicial de la reacción en cadena que podría conducir a la liberación de la energía nuclear, lo convencieron de la urgencia de evitar el

situación, pues su sucesor, el presidente Truman, decidió emplearla contra Japón cuando Alemania se había ya rendido, desestimando los consejos y reclamos de un importante número de asesores y científicos, entre ellos los propios Einstein y Szilard, quienes insistían en los peligros de su uso, en especial en el futuro. Einstein declaró poco antes de morir, cuando quedó claro que los alemanes estaban aún lejos de la bomba en el momento de su derrota, que consideraba la firma de aquella carta como el más grave error de su vida, aunque hubiera tenido razones para hacerlo. Estas razones fueron tan fuertes como para obligar a un profundo y consecuente pacifista y antimilitarista a optar por la respuesta militar ante la gravedad del peligro para la humanidad que representaba el posible triunfo de la Alemania nazi.



Al terminar la guerra surgió otro grave peligro: la carrera armamentista. Pese a los reiterados esfuerzos que algunos sectores (en particular de físicos) hicieron en contrario y de sus advertencias sobre los graves riesgos y costos que ella entrañaba, la carrera armamentista se produjo. El fruto fue terrible: el día de hoy, cuando miles de bombas nucleares han sido ya desarmadas gracias a los acuerdos de desarme parcial tan difícilmente alcanzados, existen todavía en el mundo más de 30 000 cabezas nucleares. Éste fue un problema al cual Einstein dedicó una parte muy importante de su tiempo y de sus fuerzas hasta el fin de sus días, llamando con insistencia y organizando acciones para hacer consciencia de los peligros y costos de la carrera armamentista nuclear y oponerse a ella.

El término de la guerra fría redujo en forma considerable el riesgo de una catástrofe nuclear mundial, pero la existencia de esos miles de bombas nucleares continúa siendo uno de los más graves peligros para la humanidad. No es posible descartar que poseer el arma nuclear pueda en un momento dado significar usarla, aun en problemas localizados. De hecho, este tipo de amenazas se ha vertido en más de una ocasión. Se trata, pues, de uno de aquellos problemas de interés mundial que nos atañen a todos. La única solución es el desarme nuclear total.

Notas

1. Einstein obtuvo su primer puesto universitario hasta 1909. En 1905 trabajaba como técnico en la oficina de patentes de Berna y realizaba sus investigaciones en el tiempo que le quedaba libre.
2. Cada uno de estos términos es aplicable a la descripción inicial de grandes verdades de la naturaleza y su ulterior elaboración como teoría. En el caso de observaciones experimentales, se emplea sólo el término descubrimiento: Roentgen descubrió los rayos X, Becquerel la radioactividad natural, etcétera. El término descubrir se aplica, pues, a *observar* (y reportar) por vez primera un cierto aspecto de la naturaleza. Un sentido similar (aunque con frecuencia abusivo, como en el caso de África, América o el Lejano Oriente) se usa en los descubrimientos geográficos. Sin embargo, cuando se refiere uno a las teorías físicas se habla de inventar, crear o descubrir, según el punto de vista que se adopte. Se inventa porque se está ideando algo nuevo; de manera análoga, se crea porque se está dando vida a lo nuevo. En realidad, una investigación científica tiende a ser más valiosa conforme más novedoso y original es su contenido. Finalmente, se descubre porque se está exhibiendo, exponiendo a la luz algo que ya estaba ahí desde antes de la investigación. Pero esto requiere calificación. Aquí subyace la idea



Fragmento de la serie Este - Oeste Berlín



de que el científico descubre las leyes de la naturaleza que están ahí, como si fueran parte del mundo, pero que no habían sido detectadas hasta el momento. En efecto, el fenómeno descrito es parte de la naturaleza, pero nuestra *descripción* de él, no. Ésta la construimos nosotros utilizando el lenguaje (los conceptos) que hemos creído oportuno (o hemos podido) construir. La ley no está previamente escrita; nosotros la escribimos. Y esto es un invento, un elemento creativo que agregamos, pues tenemos plena libertad de seleccionar el lenguaje utilizado. En otras palabras, los conceptos son creación libre de la mente humana. Lo que no es libre son las relaciones que existen entre ellos, que deben ser descubiertas. Por ejemplo, Darwin sintió apropiado sintetizar buena parte de sus observaciones (con lo que resumió en breves palabras un gran cúmulo de casos similares) con el concepto de *Selección Natural*. O bien, en la mecánica se observa que al presionar, jalar, empujar, etcétera, un cuerpo, éste se mueve de manera diferente. Y Newton encontró apropiado resumir y organizar estas observaciones con los conceptos de fuerza y *aceleración* y la relación entre ellas, que es la ley física. Estos conceptos han resultado útiles y han sido por ello asimilados por la correspondiente rama de la ciencia. Pero no por ello dejan de ser arbitrarios. Tanto es así que esperaríamos que el día que llegue por aquí un profesor marciano no emplee este lenguaje para referirse a los mismos fenómenos, es decir, los *explique* (o conceptualice) en forma diferente. Quién sabe cómo nos lo dirá, pero al fin y al cabo querrá decir lo mismo que nosotros, pues el comportamiento de los objetos estudiados (es decir, las correspondientes leyes o propiedades de la naturaleza) son las mismas aquí y en Marte.

3. Éste es el primer caso que se conoció de cuantización de la radiación, por lo que a Planck se le considera fundador de la teoría cuántica. La física cuántica y la relativista constituyen las dos grandes teorías físicas construidas en el siglo XX y que condujeron a la creación de una nueva física, la *física moderna*. Toda la física anterior (del siglo XIX para atrás) constituye lo que hoy se llama *física clásica*. En breves palabras la cuantización de la radiación, según la describió Planck, consiste en lo siguiente: cuando un cuerpo emite luz (hoy diríamos: cuando un átomo de un cuerpo emite luz) lo hace en cantidades discretas, es decir, por paquetes, cada uno de los cuales tiene una energía muy bien definida. Se

encuentra que la energía que se emite es siempre uno, cualquiera, de los posibles múltiplos enteros de una cantidad básica. Esta cantidad básica es lo que se llama cuanto (o *quanto*, del latín) de energía. Planck pudo determinar la energía de un cuanto y mostrar que depende del color (de la frecuencia) de la luz (a mayor frecuencia, mayor energía).

4. Al lector más acostumbrado a descripciones físicas le ofrecemos aquí un par de ejemplos para ilustrar el tipo de resultados novedosos que siguen de la teoría fotónica. Considere primero un átomo que es iluminado con luz de una cierta frecuencia. Si un electrón de este átomo absorbe un fotón de la luz recibida, ganará la energía del cuanto. De ser la frecuencia (la energía del cuanto) suficientemente alta este electrón se escapará del átomo. Éste es el llamado *efecto fotoeléctrico*. Si la frecuencia no es suficientemente alta, no se dará ese efecto por falta de energía. Luego la teoría predice que el efecto fotoeléctrico se da sólo a partir de cierta frecuencia de la luz. Esto es efectivamente observado y no puede explicarse con la física clásica. Un segundo ejemplo se obtiene al considerar la posibilidad de que al chocar el fotón con un electrón atómico, éste salga disparado, es decir, se lleve parte de la energía del fotón. En este caso la radiación que resta será de menor energía, lo que significa que su frecuencia será menor que la original. La conclusión es que cuando la radiación electromagnética de un color es desviada (dispersada) por la materia, parte de ella sale de un color diferente. La física clásica tampoco puede explicar este cambio de color de la luz desviada, fenómeno que en efecto se observa (se le llama *efecto Compton*, por su descubridor).
5. Esto difiere de las costumbres hoy en boga. En la actualidad es altamente recomendable (y en algunas instituciones es obligatorio) que el trabajo que se presenta como tesis doctoral haya sido previamente publicado, es decir, sujeto a apreciación y crítica públicas.
6. Este número es efectivamente enorme: 1 cm³ de un gas mantenido en condiciones usuales de temperatura y presión contiene varias decenas de trillones de moléculas.
7. En el vocabulario de los físicos y los matemáticos ésta es la llamada teoría de *procesos estocásticos* (estocástico es aquí sinónimo de azaroso).

