

La relatividad y la mecánica cuántica: dos métodos de abstracción

SHAHEN
HACYAN*

A pesar de la enorme importancia de la ciencia en la vida moderna, las carreras científicas en las universidades suelen ser las menos solicitadas debido, en buena parte, a la dificultad de transmitir el conocimiento científico en las escuelas. Ciencias como la física, que requieren cierto grado de abstracción, resultan poco comprensibles para la mayoría de las personas porque no son tan naturales como se cree; por el contrario, recurren a una abstracción que no encaja con facilidad en las estructuras mentales con las que percibimos e interpretamos la realidad inmediata. En el caso de la física, sus nociones abstractas se oponen al sentido común, a pesar de lo cual se quiere convencer a los estudiantes de que se trata de conceptos naturales. Esta abstracción difícil de captar se manifiesta incluso en la física clásica cuyos conceptos básicos deberían ser claros. La dificultad es mucho más evidente en las dos teorías que sustentan la física moderna: la relatividad y la mecánica cuántica. La primera utiliza conceptos que van en contra del sentido común, pero que pueden, por lo menos, explicarse con palabras del lenguaje ordinario. La segunda, en cambio, queda fuera de toda explicación racional y sólo puede describirse con el lenguaje matemático e ilustrarse con metáforas. Esto es lo que dificulta enseñar la física moderna, a pesar de su importancia.

En este artículo presentaré con cierto detalle algunos aspectos de la física, tanto clásica como moderna, que ilustran las consideraciones anteri-

ores, y haré hincapié en las dos grandes teorías del siglo XX y los conceptos que los sustentan. Estas dos teorías están basadas en modos distintos de abstraer los fenómenos; la relatividad es una teoría sintética que se construye con la unión de conceptos básicos y claros, mientras que la mecánica cuántica es una teoría analítica que parte del todo y, a partir de modelos matemáticos, llega a conceptos particulares que parecen paradójicos. Como lo mencionaré más adelante, los intentos de aplicar el método sintético a la mecánica cuántica han sido infructuosos por cuestiones que, en la actualidad, se han revelado de fondo. El propósito final de este artículo es mostrar que la física, la clásica y de manera muy particular la moderna, se basa en conceptos que van en contra del sentido común y de la experiencia inmediata, lo cual es necesario tomar en cuenta para enseñarla.

La física clásica

La física como ciencia exacta nace principalmente con los trabajos de Galileo y toma la forma de ciencia exacta, sustentada en las matemáticas, con la aparición de los Principios de Isaac Newton en 1686. Hasta la época de Descartes y Galileo, la física era muy distinta de la que conocemos en la actualidad; el modelo aceptado era el de Aristóteles, cuya descripción de la naturaleza era muy acorde con lo que indican los sentidos, sin recurrir a abstracciones ni descripciones matemáticas. La

** Físico, profesor e investigador del Instituto de Física de la UNAM, cuenta con un Doctorado en Filosofía por la Universidad de Sussex, Inglaterra. Sus Líneas de investigación son: fundamentos de la mecánica cuántica, óptica cuántica y teoría cuántica de campos.*

nueva física implicó un rompimiento con lo que parecía ser de sentido común, pero está tan bien establecida que, hoy en día, se suele pasar por alto que sus conceptos básicos, expuestos por Galileo y Newton, son abstracciones que no pertenecen al mundo inmediato de nuestros sentidos. En realidad, es la física de Aristóteles la que se ajusta en forma natural a nuestra manera de aprehender la realidad; esa física, ahora tan desacreditada, repudiaba las abstracciones y buscaba una interpretación directa de la naturaleza: por algo Aristóteles dominó durante tantos siglos el pensamiento occidental. De ello estaba plenamente consciente Galileo cuando puso los fundamentos de la nueva ciencia, tal como lo demostró en sus extensos escritos, pues para dar un paso más allá de las apariencias, se necesitaba una capacidad de abstracción que fuera en contra de lo que indican los sentidos.

Para ilustrar el hecho de que la física no es intuitiva, tomemos un ejemplo simple: el llamado principio de inercia, que postuló Galileo y que se enseña en la escuela, según el cual un cuerpo permanece siempre en movimiento, en línea recta y sin cambiar su velocidad si no se le aplica ninguna fuerza. Se supone que esto debiera ser obvio, pero ¿lo es realmente? Todo el mundo sabe que para mover una piedra hay que empujarla, y que cuando se deja de hacerlo ésta se detiene; ¿acaso una piedra se mueve indefinidamente con sólo un empujón inicial? Aquí, lo más probable es que un maestro de física explique a sus alumnos que este principio sólo se aplica a cuerpos sin fricción; estrictamente hablando, a cuerpos que se mueven en el espacio lejos de la influencia gravitacional de planetas y estrellas, y no a piedras terrestres que rozan con el suelo. Pero nadie ha visto un cuerpo moverse en línea recta e infinita por el universo.

La relatividad de Galileo

El principio de inercia está íntimamente relacionado con el principio de la relatividad de Galileo, que dice que el movimiento recto y uniforme es imposible de distinguir del reposo. Galileo tuvo que invocar este principio para explicar por qué no se percibe el movimiento de la Tierra, tanto alrededor de su eje y como a lo largo de su órbita.

Hasta tiempos de Copérnico, el sentido común siempre había indicado a los humanos que la Tierra estaba inmóvil en el centro del universo, pues era obvio y evidente que el Sol y la bóveda celeste giraban alrededor de ella.

Galileo fue el primero en explicar en forma correcta por qué la Tierra se mueve sin que nos percatemos de ello. Si viajamos en un barco, un vagón de metro o un avión, no sentimos que el vehículo esté en movimiento mientras se desplaza en línea recta y sin cambiar de dirección. Sólo nos percatamos de que se mueve cuando se enfrena, acelera, toma una curva o pasa por un bache. Cualquier vehículo puede ser un “sistema de referencia”: algo en apariencia fijo con respecto al cual medir el movimiento. Para la mayoría de los fines prácticos conviene utilizar la Tierra como sistema de referencia. Pero si queremos describir el movimiento de los planetas, es más conveniente referirse al Sol. Y si se trata de describir lo que sucede en un vagón de metro en marcha, conviene utilizar éste como sistema de referencia.

Todo movimiento es relativo, en el sentido de ser relativo a algún sistema de referencia que puede ser tan bueno como cualquier otro. Este hecho se conoce como Principio de relatividad de Galileo e implica que es imposible percatarse del movimiento de un sistema de referencia si se mueve con velocidad uniforme y en la misma dirección. Pero hasta la época de Galileo esto no era nada obvio y se discutía si, por ejemplo, una piedra que cae desde la punta del mástil de un barco en movimiento sigue la vertical con respecto al navío o se queda retrasado; la respuesta no era obvia en época de Galileo y él tuvo que recurrir a un razonamiento teórico para solucionar el problema. Aun así, su principio corresponde a un caso idealizado, en el que se desprecia la fricción del aire, pero esto no era evidente hasta que aparecieron vehículos que se mueven a bastante mayor velocidad que un barco de vela.

El éter

El principio de relatividad de Galileo empezó a tener sus primeras dificultades en el siglo XIX, cuando los científicos pudieron finalmente elucidar



la naturaleza de la luz. James Clerk Maxwell demostró que la luz es una onda eléctrica y magnética que se propaga en el espacio a la velocidad de 300 mil kilómetros por segundo.

El concepto de onda nos remite siempre a un medio que vibra: el sonido es una onda en el aire, las olas son ondas en el agua... Pero ¿qué es lo que vibra para transportar una onda de luz? No hubo más remedio que postular la existencia de una sustancia inmaterial, que supuestamente llena todo el universo, a la que se llamó “éter”. La luz sería una vibración de éste, del mismo modo que el sonido es una vibración del aire.

La existencia del hipotético éter puso en duda la validez del principio de relatividad de Galileo. En efecto, al pasar de un sistema de referencia a otro, resulta que la velocidad de la luz debe cambiar. Sería posible, entonces, saber si uno se está moviendo con respecto al éter sólo midiendo la velocidad de la luz. Esta situación no inquietó mucho a los científicos del siglo XIX. Después de todo, si existe un éter cósmico, serviría de sistema de referencia privilegiado para todos los movimientos. En cierta forma, es tranquilizante saber que existe algo inmutable en el universo, un sistema absoluto al cual referir todos los fenómenos y las leyes físicas que los describen.

Por supuesto, todo lo anterior implica la posibilidad de realizar algún tipo de experimento para determinar si la Tierra está en movimiento con respecto al éter. La manera más sencilla de comprobarlo sería medir la velocidad de la luz, que debería variar según la dirección en la que se propague. La situación sería análoga a la de un coche que se mueve a 100 kilómetros por hora; con respecto a un corredor que lo persigue a 25 kilómetros por hora, y así el coche parece moverse a 75 kilómetros por hora. Del mismo modo, la velocidad de la luz debería ser menor en la dirección del movimiento de la Tierra (299 970 kilómetros por segundo) y mayor en la dirección contraria (300 030 kilómetros por segundo).

En 1887, los físicos estadounidenses Albert A. Michelson y Edward W. Morley realizaron un famoso experimento para detectar el movimiento orbital de la Tierra en el éter. La idea consistía en enviar dos rayos de luz en direcciones perpendicu-

lares y volverlos a juntar, por medio de espejos, para así determinar si uno de los rayos tardaba más que el otro en regresar. Una diferencia de 30 kilómetros por segundo entre dos haces de luz era factible de ser medida con la precisión del aparato utilizado. Pero, para su sorpresa, no encontraron ningún cambio en la velocidad de la luz: parecía ser la misma sin importar la dirección de su movimiento con respecto al hipotético éter.

Como veremos más adelante, el problema sería resuelto con la teoría de la relatividad de Einstein, pero a costa de eliminar el éter. La luz se volvería una onda que se propaga... ¡en el vacío!

De teorías y modelos

En el prefacio de su magna obra sobre el electromagnetismo, James Clerk Maxwell (1998) distingue entre dos modos de ver este fenómeno. Uno, el que utilizó Michael Faraday, prescinde de las matemáticas, mientras que el otro, propio de los científicos continentales, se basa mucho en ellas:

Faraday, en su mente, vio líneas de fuerza atravesando todo el espacio allí donde los matemáticos vieron centros de fuerza que atraen a distancia. Faraday vio un medio allí donde ellos sólo vieron distancias. Faraday buscó el sustento de los fenómenos en acciones reales ocurriendo en el medio, ellos se contentaron con encontrarlo en un poder de acción a distancia impresa en el fluido eléctrico.

Sin embargo, Maxwell reconoce que el método de Faraday también es matemático, si bien no expresado “en la forma convencional de los símbolos matemáticos”. En realidad, los dos métodos son equivalentes y se complementan. El método de Faraday, según Maxwell, es analítico ya que “empieza con el todo y llega a las partes por análisis, mientras que los métodos matemáticos ordinarios se basan en el principio de empezar por las partes y construir el todo por síntesis” (Maxwell, 1998). Los dos métodos también fueron señalados, desde otro punto de vista, por el historiador y filósofo de la ciencia Pierre Duhem (1914). Para los científicos de la Escuela inglesa, dice Duhem, entender un fenómeno físico es diseñar un modelo que lo imite,



comprender la naturaleza de las cosas materiales es imaginar un mecanismo cuyo juego represente y simule las propiedades de los cuerpos (Duhem, 1997, p. 103). Para explicar, por ejemplo, los fenómenos eléctricos y magnéticos, un Poisson o un Gauss recurren a conceptos abstractos, puramente geométricos, de líneas de corrientes y superficies equipotenciales, mientras que para un científico inglés esas líneas de fuerza se comportan como si fueran reales, como si fueran de hule, susceptibles de estirarse, encogerse y enrollarse, aunque sabe muy bien que se trata sólo de una imagen conveniente y no de algo tangible y real. “Creíamos entrar en la morada apacible y cuidadosamente ordenada de la razón deductiva; nos encontramos en una fábrica” escribe Duhem al respecto (Duhem, 1997, p. 101).

El físico inglés, a diferencia de sus colegas continentales, se preocupa poco de las definiciones rigurosas y las deducciones precisas. Basta que su modelo funcione. Puede ser un modelo matemático, pero no es necesario que sus ecuaciones básicas estén bien fundamentadas. Por ejemplo, William Thomson, posteriormente Lord Kelvin, en *Lectures on molecular dynamics* (1904), admite sin tapujos que su objetivo para explicar un fenómeno físico, el único que lo deja satisfecho, es el de construir un modelo mecánico. Así concluye Duhem:

Mientras que para el físico francés o alemán, la parte algebraica de una teoría está destinada a reemplazar exactamente la sucesión de silogismos por la que esa teoría se desarrollaría, para el físico inglés tiene función de modelo; es un agenciarse de signos, asible para la imaginación, cuyo juego, conducido según las reglas del álgebra, imita con más o menos fidelidad las leyes de los fenómenos que quiere estudiar (Duhem, 1997, 115).

En el mismo sentido, el gran matemático francés Henri Poincaré se refirió al tratado de Maxwell sobre electricidad y magnetismo en los siguientes términos:

La primera vez que un lector francés abre el libro de Maxwell, un sentimiento de malestar, e incluso de desconfianza, se mezcla a uno de admiración...

El sabio inglés no busca construir un edificio único, definitivo y bien ordenado; más bien parece que erige un gran número de construcciones provisionales e independientes, entre las cuales las comunicaciones son difíciles y a veces hasta imposibles (Poincaré, 1954).

Pasemos a continuación a las dos teorías básicas de la física del siglo xx.

La relatividad de Einstein

Las dos teorías que revolucionaron la física del siglo pasado tienen formas, métodos y objetivos muy distintos. La teoría de la relatividad, tanto especial como general, es un monumento a la razón que impresiona al estudioso por la claridad de sus conceptos y la forma como Einstein logra sintetizarlos.

Esta teoría generaliza el principio de relatividad de Galileo, al extenderlo a todos los fenómenos físicos. Las leyes de la física deben tener la misma forma, sin importar el movimiento del sistema de referencia. De este simple postulado, Einstein extrajo toda una serie de conclusiones lógicas impecablemente y matemáticamente rigurosas. Así, las transformaciones de Lorentz, que dejan invariante la forma de las ecuaciones de Maxwell, y que para Lorentz y Poincaré representaban sólo un truco matemático, adquirieron en la teoría de la relatividad el carácter de leyes físicas perfectamente reales, propias de todos los fenómenos electromagnéticos, y que corresponden a procesos físicos reales, en este caso el paso de un sistema de referencia de otro.

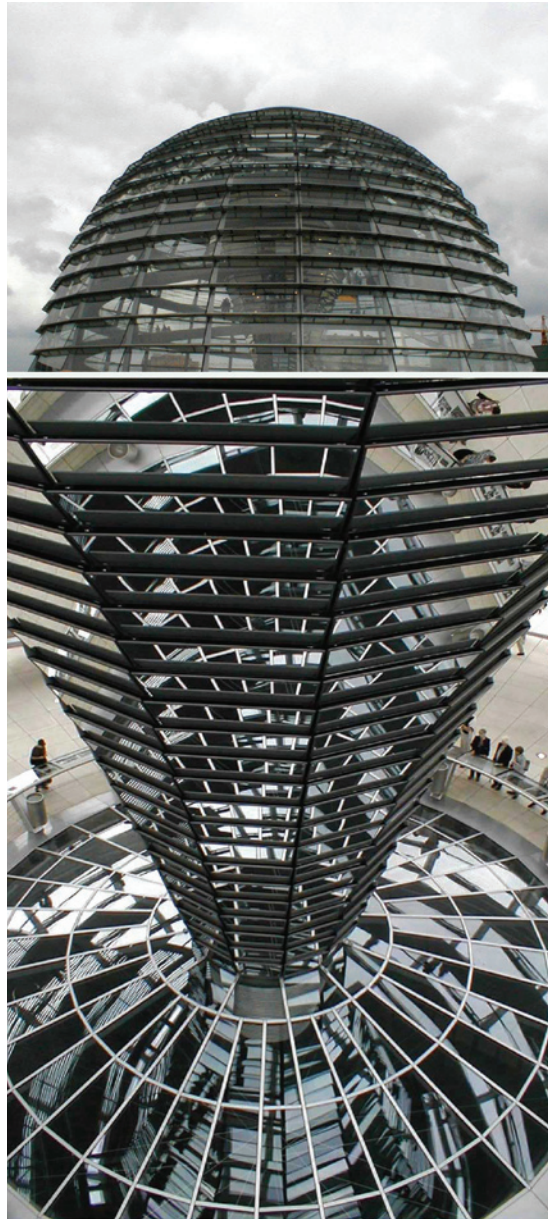
El resultado negativo del experimento de Michelson y Morley, que mencionamos más arriba, fue resuelto finalmente por Einstein. Más que resolver el problema, lo volteó: en lugar de explicar por qué la luz parece moverse siempre con la misma velocidad, aceptó este hecho como un principio fundamental de la naturaleza y sacó las conclusiones de él. Postuló que todas las leyes de la física, incluyendo las del electromagnetismo que rigen el comportamiento de la luz, tienen la misma forma independientemente de cómo se mueva un observador. Todo es relativo al sistema de referencia.



La consecuencia más inmediata del principio de relatividad es que la velocidad de la luz debe ser la misma para cualquier observador, independientemente de su movimiento, tal como muestra el experimento de Michelson y Morley. Este hecho parece contradecir el concepto de velocidad que aprendemos en la escuela; el sentido común nos dice que al correr detrás de una señal luminosa, deberíamos verla con menor velocidad. Sin embargo, las velocidades no se suman o restan en la teoría de la relatividad sino que obedecen a una fórmula más complicada. Esto se debe a que el tiempo transcurre de diversas formas; tanto el espacio como el tiempo se contraen o dilatan según quién los mida. La distancia recorrida por una señal luminosa y el tiempo que tarda en recorrerla se contraen en la misma proporción, de modo tal que la velocidad de la luz (distancia dividida por tiempo) tiene siempre el mismo valor. Lo que permanece constante al pasar de un sistema de referencia a otro es la velocidad de la luz.

Ningún experimento permite privilegiar un sistema inercial sobre otros. Esto incluye a los fenómenos electromagnéticos (en especial la luz) que escapaban al principio de relatividad de Galileo. Al no haber un sistema de referencia privilegiado, el éter volvió a caer en el olvido y la luz se volvió una onda que se propaga en el vacío.¹ En la teoría de la relatividad no existe un tiempo absoluto sino lapsos de tiempo que dependen de cada observador. Einstein mostró que existe una conexión básica entre espacio y tiempo, de modo tal que un intervalo de tiempo o de espacio varía según el observador, y la duración de los procesos depende del sistema de referencia desde el cual se observan.

Así, el tiempo transcurrido en una nave espacial que viaje a una velocidad muy cercana a la de la luz, sería notablemente menor que el medido por los que lo hicieron desde la Tierra. Por ejemplo, si una nave espacial viaja a una estrella situada a cincuenta años luz de distancia a una velocidad equivalente a 99 por ciento de la de la luz,² el viaje de ida y vuelta tardaría 100 años para los que se quedaron en la Tierra, pero sólo habrán transcurrido cerca de 14 años para los tripulantes: éstos, a su regreso, se encontrarían con sus propios nietos más viejos que ellos.



Fragmento de la serie Este – Oeste Berlín



Einstein extendió el principio de relatividad de Galileo a los fenómenos electromagnéticos y, en particular, al movimiento de la luz

Es importante señalar que cada sistema físico tiene su tiempo propio, el cual está relacionado con los fenómenos físicos que se producen en él y es simplemente el tiempo medido por un reloj fijo en ese sistema. Lo relativo es el tiempo medido en diferentes sistemas de referencias. En el ejemplo de la nave espacial, el tiempo que transcurre para los tripulantes, el que miden y perciben, es su “tiempo propio”, tan real como el “tiempo propio” transcurrido para los que se quedaron en la Tierra. La teoría de la relatividad implica que los dos tiempos propios no son iguales entre sí, pero permite calcular con exactitud la relación entre los dos.

¿Por qué no se notan efectos relativistas de contracción del tiempo en nuestra vida diaria? Porque la contracción del tiempo depende de manera sensible de la velocidad y se requieren velocidades muy cercanas a la de la luz para que se manifieste en forma notoria. Para velocidades bajas como a las que estamos acostumbrados, el efecto es tan pequeño que sólo se puede medir con instrumentos en extremo precisos. Por ejemplo, si nos movemos a 100 kilómetros por hora durante 10 años, nuestro tiempo propio sería apenas una millonésima de segundo más corto que el tiempo propio de los que se quedaron quietos.

El efecto de la contracción del tiempo se ha comprobado perfectamente en forma experimental, como es el caso de las partículas subatómicas que se generan en los grandes aceleradores de partículas y que se mueven con velocidades cercanas a la luminosa. Asimismo, la contracción del tiempo se ha confirmado para velocidades más comunes. Gracias a los relojes tan precisos que se dispone en la actualidad, los efectos relativistas se ponen de manifiesto cada vez con mayor claridad y más allá de cualquier duda. Tan es así que el Sistema de Posicionamiento Global, que determina la posición sobre la superficie terrestre midiendo el tiempo que tarda una señal de radio en viajar de un satélite a un emisor, requiere una precisión de millonésimas de segundo para establecer esa distancia; y para ello se tienen que tomar en cuenta necesariamente los efectos de la contracción relativista del tiempo.

A diferencia de la relatividad de Galileo, que sólo incluye cambios de coordenadas espaciales,

la relatividad de Einstein considera el tiempo como una cuarta coordenada en un espacio de cuatro dimensiones: el espacio-tiempo. Se revela así una estrecha relación entre espacio y tiempo. En principio, el concepto del tiempo como una cuarta dimensión no debería ser nada extraordinario, después de todo, para describir un suceso que ocurre en cierto lugar y en cierto momento, necesitamos tres coordenadas espaciales que nos indiquen la posición espacial y, además, el tiempo en el que ocurre, el cual se puede interpretar como una cuarta coordenada. En la física clásica, esta interpretación del tiempo no tiene mayores consecuencias porque las coordenadas espaciales nunca se mezclan con la temporal, en cambio, en la teoría de la relatividad están unidas forzosamente.

La teoría de la relatividad también tiene importantes consecuencias dinámicas, ya que permite interpretar masa y energía en una forma totalmente novedosa. La famosa fórmula de Einstein, $E=mc^2$, relaciona la masa de un cuerpo con su energía latente. Sin embargo, el hecho de que la masa se pueda transformar en energía depende, en la práctica, de condiciones muy especiales. Cuando Einstein publicó su trabajo no era evidente cómo lograr esa conversión, lo cual sucedería tres décadas más tarde con el descubrimiento de las reacciones nucleares, que permitieron tener acceso a grandes fuentes de energía (que en un inicio se aprovecharon para destruir, pero en eso no tuvo nada que ver Einstein).

Otra predicción importante de la teoría de la relatividad es que un cuerpo masivo nunca puede alcanzar la velocidad de la luz porque, para ello, requeriría una cantidad infinita de energía. Sólo una partícula sin masa como el fotón, la partícula de la luz,³ puede moverse a esa velocidad límite, en realidad, el fotón es una partícula sin masa y de energía pura.

Hasta la fecha la teoría de la relatividad ha pasado todas las pruebas. Tan es así que, con respecto a la velocidad de la luz, los científicos decidieron adoptarla como base para definir distancia y tiempo. De acuerdo con la convención moderna, la velocidad de la luz es, por definición, 299 792 458 metros por segundo, y el metro es sencillamente la distancia que recorre la luz en 1/299 792 458



de segundo. Sólo resta definir el segundo, y éste se acepta en la actualidad como el tiempo que tarda en vibrar cierto número de veces una onda de luz específica emitida por un átomo de cesio.

Con su teoría especial, Einstein extendió el principio de relatividad de Galileo a los fenómenos electromagnéticos y, en particular, al movimiento de la luz. Después, pasó cerca de una década cavilando sobre cómo tomar los sistemas de referencia que no son inerciales. Por último, se dio cuenta de que no hay manera de distinguir entre una fuerza no inercial, como la producida por la aceleración de un vehículo, y la gravedad. En 1916 Einstein presentó una versión más general de su teoría que incluye también el fenómeno de la gravedad en una forma totalmente novedosa. La idea básica, sin embargo, es siempre la misma: las leyes de la física no deben depender del sistema de referencia que se escoja. El principio de la teoría general de la relatividad es que el espacio-tiempo es un espacio curvo de cuatro dimensiones. Lo que percibimos como fuerza de gravedad es una manifestación de esa curvatura: la gravitación es una propiedad geométrica del espacio-tiempo.

La nitidez de la estructura teórica de la relatividad especial se puede apreciar aún más en la teoría general. Para explicar el fenómeno de la gravedad y encontrar una teoría matemática que la describa, le bastó a Einstein percatarse de que un observador en caída libre no debe sentir ninguna fuerza de gravedad. Este descubrimiento que, en sus propias palabras, marcó el día más feliz de su vida, le permitió formular una novedosa teoría de la gravedad basada en la nueva geometría creada unas décadas antes por el gran matemático del siglo XIX, Bernard Riemann.

Se puede ilustrar esta idea con la analogía de una canica que rueda sobre una superficie; si ésta es plana, la canica se moverá en línea recta, en cambio seguirá una trayectoria curva sobre una superficie deformada. Del mismo modo, se puede decir que los planetas giran alrededor del Sol porque este astro deforma el espacio-tiempo a su alrededor y los planetas se mueven siguiendo esa curvatura. Pero la diferencia fundamental con el ejemplo de la canica es que la gravedad actúa sobre un espacio-tiempo de cuatro dimensiones:

tanto el espacio como el tiempo se deforman. Por supuesto, es imposible visualizar un espacio curvo de más de dos dimensiones, excepto por medio de las matemáticas.

En la práctica, la curvatura producida por una estrella común o un planeta es casi imperceptible y sólo se manifiesta en toda su plenitud cerca de objetos muy densos, como los hoyos negros, o a muy gran escala en el universo en su conjunto. Pero, en una muy buena aproximación, el espacio-tiempo en la Tierra, en el Sistema Solar y, en general, en casi todo el espacio cósmico, es prácticamente plano. Donde hay atracción gravitatoria no existen las rectas: un rayo de luz sigue una trayectoria curva. En la teoría general de la relatividad, la geometría equivale a la física: el espacio ya no es un simple escenario de los fenómenos físicos, sino que posee propiedades dinámicas.

Si bien la curvatura del espacio-tiempo es muy difícil de detectar en la Tierra y en el Sistema Solar, puede manifestarse en toda su magnitud alrededor de grandes concentraciones de masa. El caso más espectacular es el de los llamados hoyos negros, que producen una deformación extrema del espacio y del tiempo en una forma que sólo la relatividad general puede describir. Sin entrar en los detalles de la formación de los hoyos negros, mencionaremos que existen diversas evidencias astronómicas de la existencia de tales objetos en el universo. No se puede ver un hoyo negro porque no emite luz, pero sí se pueden observar los efectos de su fuerza gravitatoria sobre la materia a su alrededor, en particular en la masa de estrellas cercanas que absorbe. En cuanto a su origen, los astrofísicos piensan que se forman por el colapso gravitacional de las estrellas que son mucho más masivas que el Sol, después de que han agotado su combustible nuclear y se apagan. También hay fuertes indicios de que se hayan formado hoyos negros millones de veces más masivos que el Sol en épocas muy remotas del universo y que, en la actualidad, éstos se encuentran en los núcleos de las galaxias.

Los hoyos negros presentan el caso más extremo de la relatividad del tiempo. Si se observa cómo cierto objeto cae en un hoyo negro, el tiempo de ese objeto parecerá congelarse visto desde lejos; en cambio, en el objeto mismo transcurrirá normalmente. Visto a distancia, la llegada al radio



de Schwarzschild tomará un tiempo infinito; en cambio, el viajero que penetra al hoyo no notará, en su propio sistema de referencia, nada particular y el tiempo seguirá transcurriendo para él en forma normal aun después de haber cruzado el fatídico horizonte de sucesos.

El universo

Cuando Isaac Newton descubrió que la gravitación es un fenómeno universal y que todos los cuerpos se atraen entre sí, se enfrentó con un problema muy serio: ¿cómo es posible que las estrellas no acaben amontonadas en un punto debido a sus mutuas atracciones? La única explicación que se le ocurrió es que el universo sea infinito, de tal modo que no exista ningún centro hacia donde la materia pueda colapsarse. En un universo infinito y perfectamente homogéneo, la atracción de la materia de un lado siempre se compensa por la atracción del lado opuesto.

Por supuesto, un universo infinito no está exento de problemas conceptuales. Después de Newton, siguieron dos siglos de discusiones metafísicas hasta que, en 1916, Albert Einstein propuso una solución novedosa basada en su teoría general de la relatividad. Con el fin de resolver la vieja disputa sobre si el universo es finito o infinito, concibió un universo limitado en extensión pero sin fronteras, en el que el espacio cósmico de tres dimensiones se curva para cerrarse sobre sí mismo. Algo semejante a la superficie bidimensional de la Tierra. Una nave espacial que se mueva siempre en la misma dirección en el universo de Einstein regresaría, finalmente, a su punto de partida, tal como un Magallanes cósmico.

Cuando Einstein presentó su modelo cosmológico, todavía no se había descubierto la expansión cósmica, por lo que el universo que imaginó originalmente era estático e inmutable. Pero persistía el problema del colapso de toda la materia debido a la gravedad. Para resolverlo, Einstein tuvo la ocurrencia de incluir un término adicional en sus fórmulas, la llamada “constante cosmológica”, que corresponde físicamente a una repulsión cósmica cuyo efecto es impedir el colapso del universo. Pero tal solución nunca dejó satis-

fecho al mismo Einstein, pues implicaba añadir a su teoría un elemento adicional prácticamente sacado de la manga.

En 1922 el físico ruso Alexander Friedmann publicó un trabajo en el que mostraba que, de acuerdo con la relatividad general, el universo se tiene que expandir, ya sea indefinidamente o hasta cierto punto a partir del cual empezaría a contraerse. Friedmann encontró que las ecuaciones fundamentales de la teoría de Einstein permiten varias posibilidades, mucho más interesantes que el universo estático, con o sin la polémica constante cosmológica. Por ejemplo, el universo podría ser curvo o plano, y de extensión infinita; todo depende de si la densidad de materia y energía excede o no cierto valor crítico, que es de unos 10–29 gramos por centímetro cúbico. Si la densidad real de materia y energía fuese menor que la crítica, el universo sería infinito y se expandiría indefinidamente; en cambio, si dicha densidad excediese el valor crítico, el universo sería cerrado y finito, en cuyo caso, la expansión se detendría en algún momento debido a la atracción gravitacional de su propia materia, para iniciar una contracción.

En resumen, el universo podría ser infinito y en expansión, en cuyo caso sería análogo a una superficie infinita de hule que se estira homogéneamente en todas las direcciones. O podría ser finito y cerrado sobre sí mismo, como lo concibió en un inicio Einstein, y sería como la superficie de un globo que se está inflando. Todo depende de la cantidad de materia.

El trabajo de Friedmann no fue tomado en serio por la comunidad científica, incluyendo al mismo Einstein. Pero una década después de su publicación, el gran astrónomo estadounidense Edwin Hubble logró medir por primera vez la distancia a las galaxias y descubrió que todas ellas presentan una velocidad de recesión; así comprobó que el universo, en efecto, se expande.

En la actualidad los astrónomos y cosmólogos piensan que el universo tuvo su origen en lo que se suele llamar la Gran Explosión, hace cerca de 14 mil millones de años. Inicialmente, la temperatura y la densidad del universo eran prácticamente ilimitadas, pero gracias a su expansión, el universo se fue enfriando. Un millón de años después



de la Gran Explosión, la temperatura cósmica había bajado a unos pocos miles de grados y en esas épocas empezaron a formarse las galaxias y las primeras estrellas. Las evidencias astronómicas más recientes coinciden muy bien con las predicciones teóricas y son consistentes con un universo perfectamente plano, es decir, un universo que se expandirá eternamente.

La mecánica cuántica

Veamos ahora el caso de la mecánica cuántica. Su nacimiento se suele asociar al trabajo de 1900 de Max Planck en el que logra deducir la fórmula para la radiación emitida por un “cuerpo negro” (en esencia, un horno cerrado en equilibrio térmico). Planck tuvo que recurrir para ello a la hipótesis de que la energía emitida está cuantizada, es decir, sólo puede tomar valores que son múltiplos enteros de alguna energía básica, como si viniera en paquetes que se pueden contar de uno en uno. Para Planck se trataba sólo de un truco matemático en espera de una teoría física más profunda que la justificara, pero el joven Einstein, en otro de sus célebres trabajos de 1905, tuvo la osadía de aceptarlo como una realidad. Así introdujo en física la idea de que la luz está constituida de partículas, paquetes de energía pura que, algunos años después, recibieron el nombre de fotones. La historia subsecuente, sin embargo, ya no fue del gusto de Einstein.

En 1911 Niels Bohr propuso un modelo heurístico del átomo de hidrógeno, sin ningún sustento teórico, pero que describía con corrección los datos experimentales. Era un modelo puramente mecánico que violaba las leyes más básicas de la electrodinámica clásica. Según el postulado de Bohr, el electrón sólo podía estar en ciertos niveles de energía y emitía fotones al pasar de un nivel a otro. Ningún mecanismo clásico permite tal cosa, pero el modelo funcionó muy bien para fines prácticos. Poco después Louis de Broglie trató de darle una interpretación más racional al asunto. Propuso que tanto los electrones como los fotones se comportan, según las circunstancias, como partículas o como ondas. La idea parecía racional y le dio cierto sustento al modelo de Bohr, pero

también condujo a una nueva interpretación de los fenómenos atómicos que no habría de ser del agrado del físico francés.

El edificio matemático de la mecánica cuántica empezó a tomar forma con los trabajos de Heisenberg y Pauli de 1925, y de Schrödinger de 1926. El joven Heisenberg, influenciado por el positivismo que estaba en boga en esa época, desarrolló una formulación matemática de la teoría cuántica que, según él, estaba basada exclusivamente en “relaciones entre cantidades que son susceptibles de medirse en principio”. En su trabajo no utilizaba para nada conceptos como la velocidad o la posición de un electrón, que no se pueden conocer ni medir, y se había concretado en nociones específicas, como la frecuencia de la luz emitida por un átomo.⁴ El artículo de Heisenberg es de lo más oscuro y su formulación no tiene ningún sustento físico, pero funciona muy bien. Tan es así que, poco después, Pauli utilizó ese mismo formalismo para resolver el problema del átomo de hidrógeno y obtuvo correctamente los valores de la energía, justo como lo postula el modelo de Bohr.

Al año siguiente Schrödinger dedujo, en un golpe de inspiración imposible de explicar, la ecuación básica que describe los fenómenos cuánticos y que lleva su nombre. Es una ecuación en la que interviene una misteriosa “función de onda” cuyo sentido físico no era nada obvio. El mismo Schrödinger pensaba en un principio que su ecuación describía las “vibraciones” de algún medio, y que, por tanto, las partículas atómicas no eran en realidad entes indivisibles, sino que eran semejantes a las ondas en un fluido. Al poco tiempo, su colega Max Born propuso una interpretación, según la cual, esa ecuación describiría la probabilidad de encontrar algún sistema atómico en un cierto estado. Se trataría, así, de “ondas de probabilidad”. Al mismo Schrödinger nunca le agradó esta interpretación, pero es la que ha subsistido hasta la fecha.

Cualquier estudiante de física que se encuentra por primera vez con el formalismo de Heisenberg o la ecuación de Schrödinger, siente un malestar como el que describía Poincaré con respecto a las ecuaciones de Maxwell, pero mucho más profundo. Se trata de la formulación fundamental de





Fragmento de la serie Este - Oeste Berlín

la mecánica cuántica y, sin embargo, es imposible deducirla de un principio simple. Más bien se trata de deducir cómo debe ser una ecuación para que sea consistente con algunos hechos empíricos, y ver si funciona. ¡El mayor misterio de la mecánica cuántica es que funciona estupendamente!

Tres cuartos de siglo después de su descubrimiento, las ecuaciones de Schrödinger y de Heisenberg siguen siendo la base de los trabajos de física cuántica. Se ha demostrado posteriormente que los dos formalismos son equivalentes entre sí, aunque el de Schrödinger es más práctico de usar en la mayoría de los casos. Estos formalismos permiten calcular y predecir efectos del mundo atómico con enorme precisión. Y sin embargo, a pesar de lo que pretendan algunos libros de texto, su derivación sigue siendo tan oscura como la primera vez en que fueron publicados.

Con los trabajos de Heisenberg, Schrödinger, Pauli y muchos más, empezó a tomar forma la llamada “interpretación de Copenhague”, defendida por Niels Bohr y una nueva generación de físicos que no temía enfrentarse a los cánones del racionalismo científico defendido por sus mayores, principalmente Einstein y Planck (como dato curioso: en 1926 Heisenberg tenía veinticuatro años y Pauli veinticinco, Schrödinger y Bohr frisaban los cuarenta, Einstein tenía 47 y Planck era un venerable patriarca de 68). Dos principios fundamentales de esta interpretación son el de superposición y el de complementariedad. Según estos principios, un sistema atómico se describe como un conjunto de estados, y cada estado puede verse en forma complementario a otro. Más específicamente, un sistema atómico, antes de ser observado, se encuentra en una superposición de todos los posibles estados en los que se puede encontrar; en el momento de realizar una observación, cuando interviene un sujeto observador, el sistema se manifiesta en uno de los posibles estados y todos los demás estados desaparecen. Por otra parte, según el principio de complementariedad, un sistema atómico puede verse de diversas formas entre sí (por ejemplo, como onda o como partícula), lo importante, otra vez, es la intervención del sujeto observador, quien determina con su intervención en cuál forma habrá de manifestarse.



La mecánica cuántica sólo permite calcular la probabilidad de que tal o cual estado sea el observado. La ecuación de Schrödinger es totalmente determinista, pero describe la evolución de todo el conjunto de estados. Permite calcular la probabilidad de que se observe tal o cual estado, pero no cuál se observará con toda certeza. Así, la intervención del observador introduce el elemento de incertidumbre de la mecánica cuántica.

Una vez hecha la observación, la función de onda deja de describir todo el conjunto y se reduce a la del estado observado. Este proceso se suele describir como el “colapso de la función de onda”. En el formalismo de Schrödinger y con la interpretación de Copenhague, la imagen es clara: se puede pensar en un conjunto de “pequeñas funciones de onda”, cada uno representando un posible estado del sistema; la medición provoca que se colapsen todas menos una, que es la correspondiente al estado en el que el sistema se va a manifestar. Es un mecanismo muy pictórico, fácil de imaginar.

¿Qué tan realista puede ser esta imagen? A Schrödinger nunca le agradó e inventó la famosa paradoja del gato al que se asocia su nombre, en la que muestra que, según el principio de superposición llevado al extremo, un gato puede estar vivo y muerto simultáneamente. Einstein también la criticó duramente porque se dio cuenta de que tomarla literalmente conducía a situaciones paradójicas. En 1936 publicó, junto con sus dos colaboradores Podolsky y Rosen, un famoso artículo en el que mostraba que el colapso de la función implicaba necesariamente algún tipo de comunicación que violaba las leyes conocidas de la física. En esencia, la paradoja de Einstein, Podolsky y Rosen consiste en que un par de partículas atómicas que hayan estado en interacción y luego se separan, se encuentran compartiendo una única función de onda; en esas condiciones la medición de una de las partículas determina el colapso de la función de onda completa, lo cual influye instantáneamente sobre el estado de la otra. La paradoja consiste en que las dos partículas pueden estar arbitrariamente separadas en el espacio, años luz si se quiere; el colapso de la función de onda que comparten ocurre como si hubiera una interacción instantánea a distancia entre ellas, pero esto

va contra uno de los principios fundamentales de la teoría de la relatividad: ningún proceso físico puede rebasar la velocidad de la luz.

Bohr, en su respuesta a Einstein, Podolsky y Rosen, insistió en que todas las paradojas surgen de querer aplicar conceptos del mundo macroscópico al mundo cuántico. Conceptos como “función de onda” y “colapso” son representaciones muy convenientes para interpretar fenómenos atómicos, pero, al igual que las líneas de campo elásticas y dúctiles del electromagnetismo clásico, no se les deben tomar demasiado literalmente, pues hacerlo conduce a paradojas.

Quizás uno de los ejemplos más notorios de cómo un modelo pictórico puede ser útil a pesar de parecer absurdo es el del mar de Dirac. Dirac encontró la ecuación que lleva su nombre y que generaliza la de Schrödinger a límites relativistas, pero se dio cuenta de que admitía soluciones con energía infinita y negativa. En lugar de desanimarse, el físico (inglés, *of course*) propuso que tales estados existen pero corresponden a un mar infinito de electrones que ocupan todos los niveles posibles de energía. Es decir, lo que llamamos vacío se puede interpretar como un pozo infinitamente profundo lleno de infinitas partículas que lo atiborran. Ahora bien, razonó Dirac, si se retira un electrón de ese mar infinito, el hoyo se observaría como un electrón con la misma masa pero con carga positiva, lo que sería una antipartícula. Y en efecto, el positrón (antipartícula del electrón) fue descubierto con todas las propiedades predichas por Dirac a partir de su modelo que suena tan absurdo.

Epílogo

En resumen, podemos afirmar que las dos grandes teorías de la física del siglo XX corresponden a cada una de los dos principales modos de pensamiento que tanto Maxwell como Duhem habían señalado hace ya un siglo.

La teoría de la relatividad es una obra maestra del razonamiento. Sus fundamentos son sencillos y claros, y sobre ellos se construye de manera sintética una teoría de gran precisión y nitidez. No en balde Einstein se educó en la tradición científica alemana, dirían seguramente Maxwell y Duhem



si lo hubiesen conocido.

En cambio, la mecánica cuántica es la obra maestra del método analítico. Se basa en modelos mecánicos y matemáticos que, llevados al extremo, suenan absurdos y conducen a paradojas: funciones de onda que se colapsan, interacciones instantáneas a distancia, infinitos que llenan infinitos. Sin embargo, para todo fin práctico, funciona de maravilla aunque nadie pueda explicar el porqué; por algo el gran físico Eugene Wigner hablaba de la "irrazonable eficiencia de las matemáticas". Pero qué necesidad hay de encontrar fundamentos profundos, diría un Thompson: con tal de que los modelos funcionen...

Puesto así el asunto, no es sorprendente que Einstein nunca haya aceptado la interpretación de Copenhague. En contra de Bohr y Heisenberg, quienes sostenían que existe una limitación esencial que impide conocer y predecir los procesos físicos con absoluta precisión, Einstein insistía

en que tal limitación se debe a la teoría cuántica misma, y que debería desaparecer cuando, en el futuro, surgiera una teoría más completa que resolviera todas las paradojas del modelo.

Sin embargo, las técnicas de laboratorio han progresado enormemente y ya es posible hacer experimentos reales con átomos, electrones o fotones aislados. Hasta la fecha, todos los resultados experimentales son consistentes con la interpretación de Copenhague, a pesar de que parecen contradecir el sentido común. La tan soñada teoría que debería sustituir a la mecánica cuántica y aclarar sus fundamentos no tiene visos de llegar. Por el contrario, según el famoso y sencillo teorema de Bell, así como otros teoremas de ese estilo, tal teoría ideal ni siquiera es factible. Incluso resulta irónico que las paradojas señaladas por Einstein, que implican una interacción instantánea a distancia, hayan propiciado muchos años después que se diseñaran experimentos en los que se manifiesta



Fragmento de la serie Este – Oeste Berlín



esta misteriosa interacción. Ya hasta existe toda una disciplina del procesamiento y la transmisión de información por medios cuánticos.

En la actualidad queda de manifiesto que tanto Bohr como Einstein tenían razón en sus respectivos ámbitos. Cada uno de ellos desarrolló una teoría de acuerdo con modos distintos de representar el mundo: el modelo mecánico y la teoría lógica. Lo que la historia ha demostrado posteriormente es que los dos modos de pensamiento que representan la realidad física pueden muy bien coexistir pacíficamente. En realidad son complementarios entre sí.

Un comentario final

Un siglo después de que Newton presentara su teoría de los colores de la luz, Goethe lo criticó duramente y propuso una teoría alternativa. El tiempo no le dio la razón al poeta, pero lo importante no es eso sino los motivos que lo llevaron a desconfiar de la nueva ciencia: “el físico domina los fenómenos naturales, acumula experiencias, los acomoda y relaciona entre sí por medio de experimentos artificiales, pero ¡eso no es la naturaleza!”, y concluyó: “Ningún arquitecto tiene la osadía de hacer pasar sus palacios por montañas y bosques”.

Werner Heisenberg, en un ensayo sobre la teoría de los colores de Goethe, escribió que las dos percepciones, la del científico y la del poeta, no se contradicen entre sí porque se refieren a dos niveles muy distintos de la realidad. La ciencia, como se entiende comúnmente, pretende describir un mundo objetivo independiente de nuestro pensamiento. Paralela a esa realidad objetiva, existe una realidad subjetiva en la que los fenómenos están íntimamente relacionados con la mente humana. Según Heisenberg, ésa es la realidad de Goethe y de los artistas. Esos dos mundos paralelos, cada uno con sus propias riquezas, ¿pueden unirse y complementarse? Heisenberg era de la opinión de que tal unión podría darse en el futuro, y como muestra citaba la mecánica cuántica, donde el observador es inseparable del fenómeno que observa.

Si durante siglos los hombres aceptaron la física de Aristóteles como evidentemente correcta, si

gigantes intelectuales como Goethe rechazaron los conceptos fundamentales de la ciencia moderna y se aferraron a una visión de la realidad directa y sin abstracciones, ¿cómo podemos esperar que nuestros escolares acepten esos mismos conceptos? Si aceptáramos que la ciencia dejó de ser natural al volverse objetiva, podríamos quizás transmitirla mejor.

Notas

1. Más adelante, los físicos recurrirían al concepto de campo, un medio invisible, definido matemáticamente, que se manifiesta sólo por sus efectos sobre la materia. La luz sería una oscilación del campo electromagnético.
2. El año luz es la distancia que viaja la luz en un año y equivale a cerca de 9 millones de millones de kilómetros. La estrella más cercana, Alfa Centauri, se encuentra a unos 4 años luz de distancia.
3. En la física moderna, la luz es tanto una onda como una partícula.
4. Al respecto vale la pena mencionar una anécdota que cuenta Heisenberg en sus memorias. La primera vez que tuvo la oportunidad de discutir su trabajo con Einstein fue en plena época positivista. Creía que Einstein simpatizaba con esa escuela filosófica por influencia de su maestro Mach, y estaba seguro de haber hecho su tarea correctamente ya que había descartado todo uso de conceptos físicos imposibles de observar. Para su sorpresa, Einstein no pareció impresionarse sino que le contestó algo que escandalizaría a cualquier positivista: “Es la teoría la que decide qué podemos observar”.

Referencias

- Duhem, P. (1914). *La théorie physique, son objet, sa structure*. [Edición facsimilar de 1997], París, Francia: Librairie Philosophique J. Vrin.
- Maxwell, J. C. (1998). *A treatise on electricity and magnetism*. Oxford, Inglaterra: Oxford University Press. Edición facsimilar: Oxford Classics Texts in the Physical Sciences, 1998.
- Poincaré, H. (1954). *Electricité et optique: La lumière et les théories électrodynamiques: Leçons professées à la Sorbonne en 1888, 1890 et 1899*. París, Francia: Gauthier-Villars. Citado por Duhem, Ref. 4.
- William, K. (1904). *Baltimore lectures on molecular dynamics and the wave theory of light*. London: C. J. Clay and sons.

