

Incertidumbre y relatividad: un homenaje a Albert Einstein

MIGUEL ÁNGEL
PÉREZ ANGÓN*

La comunidad científica ha calificado el año 1666 como *Annus mirabilis* (año milagroso) debido a la producción científica excepcional de Isaac Newton en ese año: publicó los textos donde sentó las bases del cálculo infinitesimal y de su famosa ley de la gravitación universal. Por analogía, este año de 2005 ha sido declarado por la UNESCO como el Año Mundial de la Física para conmemorar el centenario del *Annus mirabilis* de Albert Einstein: en 1905 publicó seis artículos científicos en la revista alemana *Annalen der Physik*, los cuales resultaron ser determinantes para el desarrollo de la física del siglo XX. Uno de ellos trata sobre el efecto fotoeléctrico y las propiedades cuánticas de la luz y es precisamente el que fue reconocido para el premio Nobel que recibió en 1921; otros tres de esos artículos consideran la dinámica del movimiento browniano y los otros dos sentaron los fundamentos de la teoría de la relatividad especial.¹

El efecto fotoeléctrico completó la visión introducida por Max Planck en 1900 de que no sólo los objetos a altas temperaturas emiten energía de radiación en paquetes, cuantos los llamamos ahora, sino que todo tipo de radiación debe consistir completamente de cuantos cuya energía es múltiplo entero de la energía de Planck: $E(n) = nh\nu$, donde n es cualquier entero, h es precisamente la constante física que lleva el nombre de Planck, y ν es la frecuencia de la radiación emitida. Los tres artículos de 1905 sobre el movimiento de las moléculas de un líquido (conocido como movimiento browniano), surgieron de los temas

considerados en su tesis doctoral donde estableció una forma sencilla para determinar el tamaño de las moléculas a partir de primeros principios. En sus dos últimos artículos publicados en 1905 estableció las bases de la teoría de la relatividad especial, que se aplica a las partículas que tienen velocidades cercanas a la velocidad de la luz (c). En el presente artículo describiremos cómo la combinación de los principios de esta teoría con los de la mecánica cuántica, que describe los fenómenos del mundo subatómico, ha conducido a la generación de otra más precisa que han concebido los físicos: la teoría cuántica de campos. Pero antes de ello, como una modesta contribución al homenaje que se está haciendo a Einstein en 2005, presentaremos algunos puntos de vista sobre la imagen que guarda Einstein en diferentes sectores de la comunidad internacional.

La personalidad del siglo XX

Con motivo de la celebración de la transición del siglo XX al siglo XXI, la revista estadounidense *Time* (154, 1999) realizó una encuesta en el medio internacional para seleccionar a la persona que mejor podría representar al siglo XX: Albert Einstein resultó ser dicha personalidad:

Einstein es concebido, más que ningún otro ser humano, como nuestro emblema del poder de la inteligencia, de la inteligencia en su estado más puro. Fue el científico más preeminente en un siglo dominado

**Doctor en física por la Universidad Rockefeller, es investigador titular del departamento de Física del Cinvestav y miembro del Sistema Nacional de Investigadores.*

por la ciencia. Las piedras de toque de nuestra era (la bomba atómica, la teoría del *Big-Bang*, la física cuántica y la microelectrónica), todas ellas llevan su huella. Su imagen ha llegado a ser reconocible por millones de personas como el genio entre los genios que descubrió, simplemente pensado en ello, que el universo no es como lo imaginábamos.

Sólo para remarcar al lector que la selección que hizo la revista *Time* no fue un mero efecto de la mercadotecnia, enseguida reproduzco testimonios similares pero independientes sobre las aportaciones de Einstein a la sociedad del siglo XX:

La teoría de la relatividad representó una verdadera ruptura en la historia del pensamiento científico y una superación del paradigma newtoniano. A partir de entonces, conceptos como tiempo y espacio han experimentado una mutación radical (Feldman y Ford, 1979).

A pesar de que por naturaleza y entrenamiento soy escéptico, pienso, sin el menor asomo de duda, que el hombre más importante del siglo XX fue Albert Einstein. Y no sólo del siglo XX, sino de varios más: quizás de Newton a nuestros días. De hecho, no son pocos los que piensan que probablemente Einstein haya sido el hombre más inteligente que ha vivido. Para hallar a sus posibles pares habría que pensar en Aristóteles, Shakespeare, Mozart, Leonardo... (Vasconcelos, 1995, p. 28).

El siglo XX ha tenido una aportación importante de brillantes pensadores. Einstein, de manera más notable, es el teórico más grande desde Newton, cuya visión del universo rebasó. Las ideas de Einstein condujeron a que el siglo XX sea una centuria de la física, caracterizada por el manejo de partículas subatómicas a tal grado que han producido desde bombas atómicas hasta *chips* de silicio (Isaacson, 1999, p. 2).

La inteligencia de Einstein se ha convertido en una verdadera leyenda. Con frecuencia aparecen en los diarios reportes sobre los estudios realizados a su cerebro, el cerebro de un genio:

En el único estudio jamás realizado sobre la anatomía general de su cerebro, un grupo de cientí-

ficos de la Universidad de McMaster en Ontario, Canadá, descubrió que la parte del cerebro que se cree rigiere el razonamiento matemático —la región parietal inferior— era 15% mayor que lo normal en ambos lados. Además, encontraron que el surco que normalmente corre de la parte delantera hasta la trasera, no abarcaba toda la extensión en el caso de Einstein (Reforma, 1999, p. 28A).

De mi parte, también como un ejercicio para conmemorar la transición el siglo XX al XXI, realicé una encuesta entre mis colegas para ubicar al “físico más trascendente de cada centuria desde el siglo XVI” (Pérez Angón, 1999). Como resultado, Einstein fue considerado de manera casi unánime el físico más representativo del siglo XX. Para los siglos anteriores resultaron seleccionados: Nicolás Copernico (s.XVI, por su modelo heliocéntrico, 1473–1543); Galileo Galilei (s.XVII, ley de la inercia y el método experimental, 1564–1642); Isaac Newton (s.XVIII, ley de la gravitación universal, leyes de la mecánica, descomposición espectral de la luz, 1642–1727); Michael Faraday (s.XIX, leyes de la inducción electromagnética, electrólisis, licuefacción de los gases, 1791–1867).

La relatividad

En sus artículos de 1905 sobre la relatividad especial, Einstein propuso que todo estado de movimiento o reposo es relativo, que no existe un sistema de referencia absoluto con respecto al cual se pueda medir, en particular, la velocidad de la luz (c), y que esta velocidad constituye una constante universal para todos los observadores: aproximadamente 300 000 Km/seg. Las consecuencias de estos postulados fueron en su momento impresionantes y difíciles de aceptar: los conceptos de longitud y tiempo dependen del movimiento del observador o del sistema de referencia en el que son medidos. Como esta predicción sólo es apreciable cuando los objetos observados tienen velocidades cercanas a (c), su confirmación no fue inmediata y es por eso que esta aportación no fue reconocida para el premio Nobel que se le otorgó en 1921.

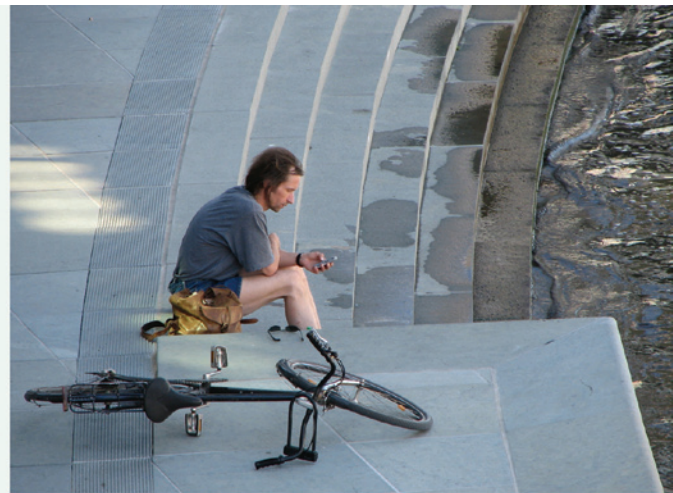
En la teoría de la relatividad especial otros



conceptos de la física también tuvieron que ser considerados como “relativos”, esto es, que su interpretación depende del estado de movimiento del observador. En particular, la masa y la energía dependen de la velocidad del observador, tal y como sucede con la intensidad de los campos eléctricos y magnéticos. La conocidísima fórmula que establece la relación entre la masa (m) y la energía de un objeto, $E=mc^2$, implica que la masa de una partícula es siempre proporcional a la energía determinada por un observador y en consecuencia sugiere que cada partícula puede liberar cantidades enormes de energía al ser aniquilada. Esta predicción fue la que trascendió con mayor facilidad al público en general y por ello se asocia, por desgracia, la teoría de la relatividad especial con su aplicación más impresionante: la tremenda energía liberada en las explosiones de bombas atómicas.

En 1915 Einstein formuló su teoría general de la relatividad como una consecuencia natural de que las leyes de la gravedad también deben verse afectadas por el principio de la relatividad. Einstein propuso que no sólo debería ser imposible determinar la velocidad absoluta del laboratorio en el que estamos realizando experimentos, sino que también debe ser imposible distinguir los cambios en su velocidad (su aceleración) de los efectos causados por las fuerzas gravitacionales sobre los objetos ubicados en nuestro laboratorio. Éste es el famoso principio de equivalencia. Como resultado se tiene que la fuerza de la gravedad distorsiona el espacio y el tiempo, ese continuo cuadri-dimensional que ha sido explotado por infinidad de autores de ciencia-ficción.

Esta nueva teoría ha tenido sus comprobaciones experimentales, espectaculares todas ellas porque



Fragmento de la serie Este – Oeste Berlín



involucran sitios donde la interacción gravitacional se manifiesta con mayor intensidad: el Sol, los pulsares, los hoyos negros y otros miembros de la fauna que habita en nuestro universo. Existe también una aplicación de la teoría general de la relatividad que puede ser más apreciada por el público en general: el sistema de posicionamiento global (GPS, por sus siglas en inglés) requiere considerar las correcciones predichas por esta teoría sobre las señales electromagnéticas enviadas por los diferentes satélites terrestres para lograr la precisión necesaria para ubicar objetos sobre la superficie terrestre y que por desgracia también son de importancia militar o estratégica. La información requerida para determinar la posición de una persona sobre la superficie terrestre precisa tres satélites para registrar las coordenadas norte-sur, este-oeste y la vertical (latitud, longitud y altura). Cada satélite envía una señal que registra su posición y el tiempo de la emisión de la señal. El reloj del observador fija la recepción de cada una de las tres señales, luego sustrae el tiempo correspondiente a la emisión de la señal para obtener el lapso de tiempo transcurrido y entonces saber qué tanto ha viajado dicha señal (a la velocidad de la luz). Esto corresponde a las distancias que tenía cada satélite con respecto al observador cuando emitió su respectiva señal. A partir de estas distancias se generan tres esferas, cada una centrada en el punto de emisión de cada satélite. La posición (tridimensional) del observador surgirá del único punto en el que dichas esferas se intersectan. Finalmente, se requiere un cuarto satélite para verificar la precisión del reloj del observador: como todos estos satélites llevan un reloj con exactitud atómica, el cuarto satélite realiza el trabajo de corregir el tiempo medido por el reloj del observador y ajustarlo al tiempo más exacto medido por los relojes atómicos de los otros satélites. Es aquí donde se requiere la precisión predicha por las ecuaciones de Einstein para describir las coordenadas de cada satélite: las señales electromagnéticas intercambiadas entre los satélites fijan su tiempo de emisión con una precisión tan alta que requieren considerar las correcciones relativistas incluidas en lo que se denomina la métrica de Schwarzschild para las coordenadas esféricas de cada uno de ellos, y se incluyen además las correcciones debidas a la

desviación de la forma de la Tierra con respecto a una esfera perfecta (Taylor y Wheeler, 2000).

Incertidumbre

El otro gran desarrollo de la física del siglo XX se dio en la frontera de lo infinitamente pequeño. En este caso involucró el trabajo colectivo de varios investigadores por un periodo largo: empezó con la cuantización de la energía emitida por un cuerpo negro (Max Planck, 1900) y culminó con las propuestas de Paul Dirac (1926) para hacer compatible la nueva teoría de la mecánica cuántica con la teoría de la relatividad especial planteada por Einstein en 1905. Entre los principales impulsores de la mecánica cuántica destacan Luis-Victor de Broglie (francés), Erwin Schrodinger y Werner Heisenberg (alemanes) y Niels Bohr (danés).

Al igual que la relatividad especial, la mecánica cuántica también rompió el esquema de pensamiento introducido por Issac Newton para la mecánica clásica: se propone que la interpretación de los fenómenos observados en el mundo subatómico debe involucrar cierto grado de incertidumbre. Se abandona la visión determinista de la física clásica y se ajusta el formalismo matemático para que sea congruente con los hechos experimentales de que es imposible medir de manera simultánea y con precisión absoluta las diferentes propiedades de las partículas subatómicas: si se desea medir la velocidad de un electrón, por ejemplo, en el proceso de medición se pierde la información precisa sobre su posición, y viceversa. Esta incertidumbre en el proceso de observación es característica de los sistemas físicos descritos por ondas, pero no se esperaba que también ocurriera en las partículas elementales como los protones, electrones, neutrones y los sistemas que se generan a partir de su asociación (átomos, moléculas). A este fenómeno se le conoce como dualidad onda-partícula.

El carácter elusivo de las partículas elementales, los cuantos, dio lugar a un sinnúmero de controversias, algunas de las cuales persisten hasta la fecha. No obstante, las predicciones de la mecánica cuántica han sido puestas a prueba en infinidad de experimentos y siempre han salido adelante. En particular, la mecánica cuántica está



detrás del éxito asociado a la miniaturización de los dispositivos electrónicos y del efecto láser que ahora nos son tan familiares.

La relatividad y la incertidumbre

Existe un régimen de la física donde las ideas generadas por la relatividad especial y la mecánica cuántica se manifiestan de manera simultánea: la física de las partículas elementales. A la teoría que surge de la coexistencia de los principios asociados a estas dos grandes teorías del siglo XX se le denomina teoría cuántica de campos. Es la teoría más precisa que los físicos han podido crear y tiene algunas predicciones que coinciden con los resultados experimentales hasta una parte en una mil millonésima (esto es, coinciden en nueve cifras significativas).

El “modelo estándar” de las interacciones conocidas entre las partículas elementales (electromagnéticas y nucleares fuerte y débil) es en la actualidad el paradigma de las teorías cuánticas de campo. Este modelo es consistente con todas las observaciones experimentales que se han observado en los grandes aceleradores de partículas y fue la culminación de varias generaciones de físicos con personalidades tan brillantes como las que crearon la mecánica cuántica y la relatividad especial. Entre ellos, sólo para mencionar mi propia selección, se ubican Richard Feynman, Murray Gellman, Steve Weinberg, Sheldon Glasgown (todos ellos estadounidenses), Abdus Salam (paquistaní), Enrico Fermi (italiano), Gerard T’Hooft, Martinus Veltman (holandeses), y Peter Higgs (inglés).

La continuación de estos desarrollos teóricos ha conducido de manera natural a intentos más ambiciosos para explicar las cuatro interacciones básicas de la naturaleza (gravitacional, electromagnética y nucleares fuerte y débil) de manera unificada. Ahora esta teoría se conoce como teoría de cuerdas, ya que las entidades básicas no son

partículas puntuales sino objetos de una dimensión (cuerdas) cuya vibración genera los sistemas físicos que identificamos con las partículas elementales. Esta teoría todavía está muy lejos de lograr predicciones tan precisas como las de las teorías cuánticas de campos, pero desde el punto de vista matemático ha resuelto muchas de las dificultades de consistencia interna que tenían estas teorías. Se puede concluir diciendo que estas teorías de cuerdas pretenden resolver el gran reto al que se enfrentó Einstein en su momento: la posibilidad de unificar la mecánica cuántica con la teoría de la relatividad general.

Nota

1. Para mayores detalles sobre las aportaciones de Albert Einstein se recomienda consultar la mejor biografía que se ha escrito hasta ahora, en mi opinión: Pais, A. (1982). *Subtle is the Lord*. Londres, Inglaterra: Oxford University Press. Existe versión en español de Alfaguara.

Referencias

El cerebro de Einstein. (1999, 18 de junio de 1999). *Reforma*, p.28A.

Feldman, A. y Ford P. (1979). *Grandes científicos e inventores* (p.110). Barcelona, España: Hyma.

Goldman, F. (1999, 31 de diciembre). Albert Einstein (1979-1955). *Time*, 154, 28.

Isaacson, W. (1999, 29 de marzo). Who mattered and why. *Time*, 153, p.2.

Pérez Angón, M. A. (1999). Relatividad y Mecánica Cuántica. *Avance y Perspectiva*, 18, p.275.

Taylor, F. y Wheeler, J. A. (2000). *Exploring black holes: introduction to general relativity*. Nueva York, E.U.: Wiley.

Vasconcelos, H. (1995, 6 de julio). La personalidad del siglo. *La Jornada*, 28.

