

## Albert Einstein (1879-1955) y su ciencia<sup>1</sup>

por

José A. de Azcárraga

*Hay algo que desearía preguntarle. Cuando un matemático dedicado a la investigación de acciones y resultados físicos ha llegado a sus conclusiones, ¿no podría expresarlas en un lenguaje común de forma tan clara, completa y precisa como en las fórmulas matemáticas? Y en ese caso, ¿no sería una gran ventaja para aquéllos como yo que se hiciera así?... Si ello fuera posible, ¿no sería una gran cosa que los matemáticos que trabajan en estos temas nos transmitieran sus resultados en forma popular, apta para trabajar sobre ella, así como en la que les es propia y específica?*

Carta del físico experimental Michael Faraday (1791-1867), a los 76 años, al más teórico James Clerk Maxwell (1831-79), de 36.

*En mi opinión, sólo hay una forma de aproximar un científico eminente al gran público, y es discutiendo y explicando, en un lenguaje que en general sea comprensible, los problemas y las soluciones que han constituido el trabajo de toda su vida. Por supuesto... el aspecto personal también ha de ser considerado, pero no ha de convertirse en el asunto principal...*

De una carta de Einstein escrita en 1942<sup>2</sup>.

*Incluso aunque pudiera ser Shakespeare, preferiría ser Faraday.*

Aldous Huxley (1894-1963).

---

<sup>1</sup>Agradecemos a la *Revista de la Unión Iberoamericana de Sociedades de Física* los permisos de reproducción de este artículo aparecido en el Vol. 1 (19), número 1 (2005) de esa publicación.

<sup>2</sup>El espíritu que expresan estas dos citas es el que anima este artículo, destinado al lector no especialista. Por ello he indicado, la primera vez que aparece un personaje relevante, algún dato y los años en que vivió con objeto de situarlo histórica y cronológicamente.

## 1 LOS COMIENZOS DE EINSTEIN Y SU AÑO MARAVILLOSO

*La Naturaleza está escrita en lenguaje matemático.*

Galileo Galilei (1564-1642), *Il Saggiatore* [el ensayador] , 1623.

*Antes se creía que si desapareciera del universo toda la materia, el espacio y el tiempo permanecerían. De acuerdo con la teoría de la relatividad, el espacio y el tiempo desaparecerían juntamente con la materia.*

Einstein a un periodista en Estados Unidos, 1921.

Las bibliotecas que tienen esa suerte guardan, como la joya más preciada, los volúmenes 17 y 18 de la revista científica alemana *Annalen der Physik*, publicados en 1905. Se hallan en ellos cuatro artículos –nada extensos, por cierto– escritos en seis meses por Albert Einstein, el genial científico nacido el 14 de Marzo de 1879. Parece imposible que en tan corto espacio de tiempo se pudieran concebir tantas y tan extraordinarias ideas. Las líneas que siguen pretenden acercar al lector no especialista la obra y la figura de uno de los más grandes científicos que han existido.

Es imposible sobrestimar la trascendencia de esos cuatro trabajos, que Einstein publicó hace un siglo, con sólo 26 años de edad; debido a su importancia, el año 2005 ha sido declarado año internacional de la física. El año 1905 suele mencionarse como el *Annus mirabilis* de Einstein, recordando los logros de Isaac Newton (1642-1727) en el campo de la física y de las matemáticas durante otro año milagroso, 1666, en el que estableció –nada menos– las bases del cálculo diferencial, la mecánica, la teoría de la gravedad y la del color (sus famosos *Principia* se publicaron mucho más tarde, en 1687, y su *Optiks* en 1704). En efecto, en el primero de sus trabajos Einstein sugiere que el intercambio de energía entre la radiación y la materia se hace en múltiplos de una unidad elemental, introduciendo la noción de cuantos de luz para explicar el efecto fotoeléctrico; Einstein llamó *Energiequanten* y *Lichtquanten* a esas unidades elementales de energía. La idea del fotón como corpúsculo luminoso es posterior; la introdujo en 1916, y quedó definitivamente establecida tras las experiencias de Compton en 1923, que pusieron de manifiesto la consistencia de la relatividad especial con la idea de un corpúsculo luminoso (el nombre, fotón, fue introducido por Gilbert Newton Lewis en 1926).

En el segundo artículo, en el que se basaría su tesis doctoral, realiza un estudio sobre el movimiento browniano –descubierto en 1828 por el botánico escocés Robert Brown– con objeto de “encontrar hechos que garanticen lo más posible la existencia de átomos de tamaño definido”, cuya realidad no era entonces universalmente admitida: el grupo de los escépticos incluía a Wilhelm Ostwald (1853-1932, Nobel de Química en 1909) y al físico, historiador y filósofo austriaco Ernst Mach (1838-1916), quien también realizó importantes estudios experimentales en el campo de la aerodinámica, donde perdura ‘el número de Mach’. En el tercer trabajo, titulado *Sobre la electrodinámica de*

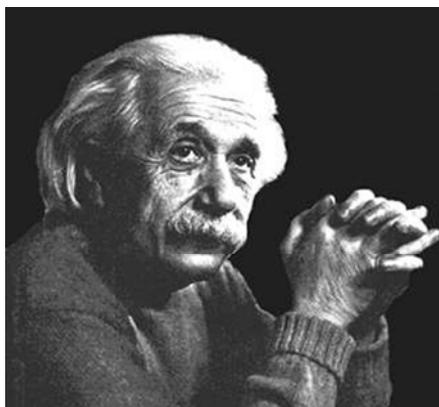
*los cuerpos en movimiento*, Einstein sienta las bases de la teoría de la relatividad especial, y en el cuarto (éste ya en el volumen 18 de los *Annalen*) aparece por primera vez la famosa relación que determina la energía asociada a la masa. Más exactamente: “si un cuerpo proporciona energía en forma de radiación, su masa disminuye en  $L/c^2$  ... por lo que llegamos a la conclusión general de que la masa de un cuerpo es la medida de su contenido energético” ( $L$  es aquí la energía; como tal, la famosa fórmula  $E = mc^2$  aparece en trabajos posteriores de 1907).

Aunque el nombre de Einstein está indisolublemente unido al de la relatividad, es bien sabido que el premio Nobel no lo recibió por ella. Fue su teoría del efecto fotoeléctrico el motivo oficial de ese galardón, una vez que el norteamericano Robert Millikan (1868-1953, Nobel de física en 1923) la confirmó experimentalmente en 1914. Tal trabajo es, en cierto modo, más sorprendente que el de la relatividad; al fin y al cabo, la relatividad es una teoría *clásica*, y la del efecto fotoeléctrico es una teoría *cuántica*. Prueba de lo revolucionaria que resultaba entonces la teoría de Einstein del efecto fotoeléctrico son los reparos que la Academia de Ciencias Prusiana le oponía –por supuesto antes de 1914– en el mismo escrito en el que, tras elogiar sus otras muchas contribuciones, le aceptaba como miembro: “... puede afirmarse que difícilmente hay alguno, entre los grandes problemas en los que la física moderna es tan rica, al que Einstein no haya hecho una contribución importante. El hecho de que en alguna ocasión sus especulaciones no hayan dado en el blanco como, por ejemplo, en su hipótesis de los cuantos de luz, no puede tenerse muy en cuenta ya que no es posible introducir ideas fundamentalmente nuevas... sin arriesgarse de vez en cuando”. Einstein recibió el premio Nobel de 1921, que se le concedió por “sus servicios a la física teórica y especialmente por su descubrimiento de la ley del efecto fotoeléctrico”.

¿Cómo llegó Einstein a sus descubrimientos de 1905? Einstein nació, de padres judíos, en Ulm (Württemberg). Un año después de su nacimiento, su familia se trasladó a Munich, donde su padre y su tío Jacob establecieron un pequeño negocio de suministros eléctricos. Nada especial puede decirse de su infancia, que transcurrió en el seno de una familia acomodada, aunque de economía inestable. Tardo en aprender a hablar –parece ser que no lo hizo antes de los tres años de edad– fue un estudiante corriente en el colegio. A los cinco años fue a una escuela primaria (*Volksschule*) católica, y los diez ingresó en el *Gymnasium* (Instituto) *Luitpold* de Munich, de ambiente liberal y culto, en el que la mayoría de los alumnos eran católicos y un cinco por ciento judíos (ese instituto, aunque situado en otro lugar, se llama hoy *Albert Einstein Gymnasium*). De esa época escribió más tarde: “como alumno no era ni bueno ni malo. Mi principal debilidad era mi escasa memoria para las palabras y los textos”. Einstein mostró ya entonces su predilección por las ciencias; de hecho, su maestro de griego –signatura por la que no sentía gran interés– llegó a decirle que “nunca llegaría a ninguna parte”. Pero quien piense ingenuamente que el poco aprovechamiento en los primeros años es garantía de éxito futuro, debería notar sus siguientes palabras: “en matemáticas y física estaba, gracias

al estudio que hice por mi cuenta, muy por encima del nivel del colegio”. Y tampoco todo eran matemáticas y física: a los trece años leyó la *Crítica de la razón pura* de Kant, mostrando una afición a la filosofía que perduraría toda su vida. Einstein también recibió clases de violín, que estudió hasta los 14 años; esta afición a la música, heredada de su madre, la mantuvo después, no desaprovechando ninguna ocasión de participar en conciertos de música de cámara. En esta afición coincidiría con otros grandes físicos de comienzos del siglo XX: Max Planck y Werner Heisenberg, por ejemplo, fueron excelentes pianistas. En ese período juvenil, Einstein revelaba ya algunos aspectos de la que sería su personalidad: popular, pero independiente y distante al mismo tiempo; con muchos amigos, pero pocos íntimos.

Einstein mostró desde su infancia un ávido interés por todo lo que le rodeaba. “Soy apasionadamente curioso” diría más tarde. A los cinco años su padre le regaló una brújula cuyo funcionamiento le produjo, ya en tan temprana edad, una enorme impresión. A los once comenzó a estudiar a Euclides en el “librito sagrado de la geometría” como él mismo lo llamaba. “Este acontecimiento fue uno de los más grandes de mi vida... no podía imaginar algo más delicioso en el mundo” dijo después, afirmación que confirma la precoz genialidad de Einstein. Pero tras esas satisfacciones llegaron pronto los sinsabores. A los 15 años, y en parte bajo presión de sus profesores (“su sola presencia –decían– echa a perder a toda la clase”) Einstein abandonó el *Luitpold Gymnasium*, cuyos métodos mecánicos y memorísticos y su estricta disciplina le disgustaban profundamente. Su padre había tenido que trasladar en esa época su negocio y su familia a Italia, y a Milán se dirigió el joven Albert para reunirse con ellos. Tras un breve período de felicidad, durante el que se impuso un severo programa de estudio de matemáticas, el negocio paterno volvió a flaquear, y Einstein tuvo que enfrentarse de nuevo con la realidad. En 1895, con poco más de 16 años, hizo el examen de ingreso en el departamento de ingeniería de la *Eidgenössische Technische Hochschule* o Escuela Superior Técnica Cantonal, el famoso ETH o Politécnico de Zurich.



Contra lo que pudiera imaginarse, Einstein fue suspendido en este examen de ingreso. Bien es verdad que la edad normal para superarlo eran los 18 años. Pero sus resultados en matemáticas y física fueron tan buenos, que se le recomendó que se examinara de nuevo después de obtener el diploma en la escuela cantonal. Así lo hizo Einstein en Aarau, donde pasó un año feliz, y en 1896 ingresó en el ETH como estudiante de matemáticas y de física. La independencia de su conducta y pensamiento, que ya había mostrado en el *Gymnasium*, se manifestó de nuevo en el Politécnico: el matemático Hermann Minkowski (1864-1909), profesor suyo, diría de él que como alumno era un genio, pero como estudiante un vago de siete suelas. Pese a tener excelentes maestros (Minkowski y Hurwitz entre los matemáticos), Einstein asistía a las clases irregularmente, trabajaba la mayor parte del tiempo en el laboratorio de física –fascinado por el contacto directo con la experimentación– y dedicaba el resto de tiempo, en casa, al estudio de los grandes pioneros de la física y la filosofía. También se aficionó entonces a la literatura; le gustaban especialmente Dickens, Balzac y Dostoyevski, y de éste *Los hermanos Karamazov*, probablemente la mejor novela que se ha escrito desde *El Quijote*, que ahora (2005) cumple 400 años.

A menudo le acompañaba en su trabajo y sus lecturas Mileva Marić (1875-1948), la inteligente y decidida estudiante serbia que acabaría siendo su primera esposa y a la que más tarde, con el paso del tiempo, haría profundamente desgraciada<sup>3</sup>. El ambiente de Zurich de aquella época era especialmente

---

<sup>3</sup>De acuerdo con la opinión de Einstein que encabeza este artículo, sólo nos interesan aquí los aspectos científicos y públicos de la vida de Einstein, no su vida privada. Hubo en ella, como en la de otros grandes hombres, como por ejemplo Bertrand Russell o Pablo Picasso, aspectos menos ejemplares. El Einstein equilibrado, en paz consigo mismo y con aire bonachón e irónico que reflejan las conocidas fotos y los escritos de su madurez, ya en Estados Unidos, no siempre se corresponde con el Einstein europeo. El joven Einstein fue con frecuencia duro y contradictorio, animado de fuertes pasiones que en vano trataba de reprimir enérgicamente. Einstein no fue buen esposo (ni buen padre, aunque sin llegar al extremo de Russell o Picasso). Con Mileva Marić tuvo dos hijos, Hans Albert (1904-73), quien sería con el tiempo profesor en Estados Unidos y reconocido experto en hidrología, y Eduard ('Tede', 1910-65), muy inteligente pero desdichado: en 1920 se le diagnosticó esquizofrenia, y murió casi olvidado en una institución psiquiátrica en Zurich. Con Mileva tuvo también una hija antes de casarse, Lieserl (1902-?), de cuyo nacimiento se pierde enseguida, misteriosamente, todo rastro; probablemente se dio en adopción. Su misma existencia fue mantenida en secreto hasta 1987. De hecho, las cartas y documentos de Einstein de carácter más personal fueron celosamente custodiados por los albaceas literarios de Einstein (su secretaria y muy beneficiada heredera, Helen Dukas, y Otto Nathan), quienes impidieron la consulta de todos aquellos que pudieran enturbiar su figura. Muchos documentos de carácter personal, hoy bajo el control de la Universidad Hebrea de Jerusalén y en la Biblioteca Nacional Universitaria israelí, siguen aún inaccesibles.

Einstein se divorció de Mileva Marić en febrero de 1919, justo al alcanzar la fama que ella no llegó a disfrutar. Cuando estando ya divorciado recibió el Nobel, Einstein entregó íntegramente el dinero del premio a Mileva, a cuyo cuidado acabaría quedando el hijo menor

propicio a la discusión y al debate: se encontraban allí, jóvenes entonces y en heterogénea mezcla, personajes como Rosa Luxemburg, León Trotsky, Chaim Weizmann, Carl Gustav Jung y Friederich Adler, hijo este último del fundador del partido socialdemócrata austríaco y amigo personal de Einstein. A pesar de ello, y gracias en buena parte a los excelentes y trabajados apuntes que le prestaba su compañero Marcel Grossmann, que acabaría siendo un excelente matemático, Einstein se graduó el 28 de Julio de 1900 (con una nota media de 5 sobre 6). Curiosamente, el 14 de Diciembre de ese año Max Planck (1858-1947, Nobel de física de 1918) introducía ante la Sociedad Alemana de Física su famosa constante  $h$ , “en un acto de desesperación” destinado a dar cuenta adecuadamente de todo el espectro de la radiación del cuerpo negro. Esa fecha puede considerarse –sin que Planck fuera consciente de ello– la del nacimiento de la física cuántica, a la que Einstein contribuyó de forma esencial poco después. Por entonces Einstein era apátrida pues, disgustado “por la mentalidad militar del Estado alemán”, había renunciado a la ciudadanía alemana en Enero de 1896. Sólo en febrero de 1901 adquirió en Zurich la nacionalidad suiza que conservó el resto de su vida, aunque transitoriamente recuperó después la nacionalidad alemana. A partir de 1940 adquirió también, como veremos, la estadounidense.

Incapaz de encontrar un trabajo académico estable, Einstein se colocó en 1902 –recomendado por el padre de Grossmann– en la oficina de patentes de Berna. Ya con un sueldo fijo, pero modesto, se casó al año siguiente con Mileva Marić, aunque ésta no contaba con la aprobación de la madre de Einstein (“ella es un libro como tú, y deberías tener una esposa... hipotecas tu futuro y cierras tu vida”, le decía). Es probable que su trabajo en la oficina de patentes, cuyo objeto era informar sobre la viabilidad de las invenciones, influyera en sus primeros trabajos sobre la termodinámica, también publicados en los *Annalen*. Es fácil imaginar que pasaran por sus manos proyectos de móviles perpetuos y otros absurdos semejantes cuyo imposible funcionamiento tuviera Einstein que detectar. Casi sin medios ni posibilidad de consulta en bibliotecas adecuadas, Einstein redescubrió algunas de las ideas del vienés Ludwig Boltzmann (1844-1906), el máximo exponente –junto con el estadounidense Josiah Gibbs (1839-1903)– de la física estadística (entonces teoría cinética de los gases, iniciada por Rudolf Clausius (1822-88)). Sin embargo, lo mejor llegaría poco después. En

---

enfermo. Einstein había hecho esta forzada concesión antes de que le concedieran el Nobel, que estaba seguro de recibir, como parte de los acuerdos económicos necesarios para conseguir el divorcio. Ese mismo año se casó con su prima Elsa Einstein (1876-1936), viuda y con dos hijas. Elsa era mayor que él, como Mileva, y de ella no tuvo descendencia. Tras partir con Elsa en 1932 hacia los Estados Unidos, Einstein ya no volvió a ver a su primera esposa ni a su hijo menor Eduard, para entonces ya claramente trastornado. El hijo mayor, Hans Albert, emigró a su vez con su familia a los Estados Unidos en 1938. Mileva murió, completamente sola, en 1948; su tumba en el cementerio de Nordheim en Zurich desapareció tras una reorganización de éste. La grandeza que Einstein tuvo en el ámbito público no la manifestó, desgraciadamente, en su entorno familiar más próximo.

1905 escribía a su amigo Konrad Habicht: “Pronto te enviaré cuatro trabajos ... el primero es ... muy revolucionario”. Este primer trabajo –la teoría del efecto fotoeléctrico– le valió el Nobel de física de 1921. Para entonces, sin embargo, ya era mundialmente famoso por la teoría de la relatividad.

## 2 EINSTEIN Y SUS DOS RELATIVIDADES

*Nature and Nature's laws lay hid in night; God said, let Newton be! And all was light.*

Alexander Pope (1688-1744).

*Come celebrate with me in song the same of Newton, to the Muses dear; for he unlocked the hidden treasures of truth ... Nearer the gods no mortal may approach.*

Edmond Halley (1656-1742) [descubridor del cometa que lleva su nombre], de la *Oda a Newton* en los *Principia*, obra ayudó a publicar.

*La cosa más incomprensible del mundo es que sea comprensible*

Einstein

La historia de la ciencia proporciona ocasionalmente curiosas coincidencias. El año de la muerte de Galileo, 1642, fue el del nacimiento de Isaac Newton (1643 si se adapta al calendario gregoriano, que no entró en vigor en Inglaterra hasta 1752). Entre otras muchas contribuciones a la física y a las matemáticas, Newton formuló las famosas leyes de la mecánica justamente denominada newtoniana, en cuyo cuerpo doctrinal quedaron comprendidos los hallazgos de Galileo. Un contemporáneo de Newton, el poeta Alexander Pope, afirmó en los versos que encabezan este capítulo: “La Naturaleza y sus leyes yacían ocultas en la noche; Dios dijo: que Newton sea, y todo se hizo luz”. Einstein nació en 1879, el año de la muerte del gran físico escocés James Clerk Maxwell (1831-79), quien unificó la electricidad y el magnetismo (y la óptica) en la década de 1860. Y fue precisamente a partir del análisis de la teoría del electromagnetismo de Maxwell (cuyo *Treatise on Electricity and Magnetism* apareció en 1873) como Einstein llegó a la formulación de su teoría de la relatividad especial. Einstein aprendió la teoría de Maxwell por su cuenta (“el tema más fascinante de mi época estudiantil”, según sus propias palabras); las ecuaciones de Maxwell, hoy parte del bagaje esencial de cualquier físico o ingeniero, no se enseñaban en el Politécnico de Zurich cuando él estudiaba allí. Einstein envió a publicar su trabajo sobre la relatividad especial ya mencionado (*Zur Elektrodynamik bewegter Körper*) tan sólo cuatro meses después del artículo sobre el efecto fotoeléctrico.

Otros científicos están asociados a los orígenes de la relatividad especial, como el gran matemático francés Henri Poincaré (1854-1912) (cuyo análisis

del problema de tres graves de 1889 se juzga hoy como precursor de la teoría del caos) y el físico holandés Hendrik A. Lorentz (1853-1928, Nobel en 1902). Poincaré introdujo en 1904 el ‘principio de relatividad’, según el cual “las leyes de la física deben ser las mismas para un observador ‘fijo’ que para uno que se mueve uniformemente respecto a él”, concluyendo tras analizar la situación experimental, que “debe existir una dinámica enteramente nueva, caracterizada de modo fundamental por la regla de que no puede haber ninguna velocidad que exceda a la de la luz” en la que “la inercia crecería con la velocidad”. Pero es a Einstein a quien debe atribuirse el establecimiento de la *teoría* de la relatividad especial. El libro de Whittaker de 1953 (*A History of the Theories of Aether and Electricity*, vol II), que atribuye el mérito a Lorentz y Poincaré, es el ejemplo más significativo de la tendencia opuesta. Whittaker, que dedica el capítulo segundo de su libro a la ‘teoría de la relatividad de Poincaré y Lorentz’, recibió muchas críticas por su postura. Se ha discutido mucho si la experiencia de los físicos americanos Albert Michelson (1852-1931, Nobel en 1907) y Edward W. Morley (1838-1923) influyó en Einstein. Éstos habían realizado en 1887 un famosísimo experimento cuyo resultado –la constancia de la velocidad de la luz– podía interpretarse como una prueba de la teoría de Einstein de 1905. He aquí su respuesta, escrita en una carta a un historiador un año antes de su muerte: “En mis razonamientos la experiencia de Michelson no tuvo considerable influencia. Ni siquiera recuerdo si la conocía cuando escribí mi primer artículo”.

Recientemente se ha especulado sobre si Mileva Marić participó o no en el trabajo de la relatividad especial de 1905. Este artículo, como los otros ya citados, lo firmó Einstein exclusivamente; en él, por cierto, no hay una sola referencia a trabajos anteriores. Einstein sólo menciona, al final, a su gran amigo Michele Besso “por varias valiosas sugerencias”. Desde luego consta que a Albert y a Mileva les unió también su común pasión por la física, pero las críticas sobre la equidad de Einstein no reconociendo la ayuda de Mileva son muy discutibles, aunque en esa época él se refiriera a ella como su “mano derecha” y a sus primeros estudios sobre la relatividad como “nuestro trabajo”. Esta falta de reconocimiento se ha llegado a comparar, con evidente desmesura, con la de ilustres postergadas como Lise Meitner (fisión nuclear), Rosalind Franklin (estructura del ADN) o Jocelyn Bell (pulsars), probablemente merecedoras de un Nobel que, por razones diversas, nunca llegaron a recibir. Lo más razonable es pensar que Mileva ayudó a Einstein comprobando sus cálculos, no especialmente difíciles para ese trabajo. En cualquier caso Mileva, ya ocupada en el cuidado de su primer hijo Hans Albert y después del segundo, Eduard, no pudo seguir el ritmo y la capacidad creativa de su genial esposo, lo que constituyó una razón adicional para su infelicidad.

El *principio de relatividad* establece que las leyes de la física son iguales en todos los sistemas inerciales: las magnitudes físicas pueden cambiar de *valor* numérico al pasar de uno a otro, pero en todos ellos rigen idénticas *leyes*. Así pues, su nombre no es especialmente afortunado (el propio Einstein

lo lamentaría más tarde), pues si bien la elección de sistema inercial no es importante –es *relativa*– el *principio* nos habla sobre todo de lo que no lo es: de la constancia o invariancia de las *leyes* físicas respecto al sistema inercial considerado. En un manuscrito sin fecha que se conserva en la Universidad Hebrea de Jerusalén, el propio Einstein resume así el principio de relatividad y la relatividad especial:

*Teoría de la relatividad. Toda teoría física emplea un sistema de coordenadas (descripción del lugar) y el concepto del tiempo. En la mecánica clásica, cuyos fundadores fueron Galileo y Newton, las coordenadas de un punto están referidas a un 'sistema inercial', esto es, a un sistema en el cual la ley de inercia de Galileo es válida. De acuerdo con esta teoría hay una infinidad de sistemas inerciales que se mueven uniformemente entre sí; se afirma que las leyes son válidas en cada uno de esos sistemas. El tiempo es tratado como una magnitud independiente que es la misma para todos los sistemas inerciales. Esta equivalencia de los sistemas inerciales se denomina 'Principio de relatividad especial'. [Einstein se está refiriendo aquí, realmente, al principio de relatividad newtoniano o galileano, ya que habla de la ley de inercia de Galileo].*

*Teoría especial de la relatividad. El origen de esta teoría radica en el convencimiento, reforzado por muchos hechos empíricos, de que la velocidad de la luz posee el mismo valor constante en todos los sistemas inerciales. A partir de este principio se llega al resultado de que las coordenadas espaciales y el tiempo están sujetas a distintas leyes de transformación (al pasar de un sistema inercial a otro) de las que se había supuesto anteriormente.*

Aquí se separa la mecánica *einsteiniana* de la *newtoniana*, en la que se suma la velocidad de un objeto respecto de un sistema de referencia que se mueve uniformemente (la de pasajero que anda en un vagón de tren, por ejemplo) a la velocidad del sistema (la del tren) para conocer la total (la del pasajero respecto a la estación). Sin embargo, en la acepción auténtica del término, la mecánica newtoniana –como Einstein muestra arriba en el primero de los dos párrafos precedentes– es también *relativista*. Lo que cambia es el tipo de transformaciones que relacionan los distintos sistemas inerciales, que en el caso de la mecánica newtoniana determinan el llamado *grupo de Galileo* y el *principio de relatividad galileano*, y que en el caso de la mecánica relativista einsteiniana (o 'relativista' a secas, en el uso corriente e inadecuado del término) definen un grupo diferente, el de *Lorentz* (o más exactamente, de *Poincaré*). Einstein observó en su trabajo de 1905 que las ecuaciones de Maxwell (las *leyes* del electromagnetismo) eran invariantes bajo las transformaciones de Lorentz. Einstein continúa:

*El contenido de la teoría lo constituye la respuesta a la pregunta: ¿cómo deben modificarse las leyes conocidas de la naturaleza*

*para dar cuenta del postulado de la constancia de la velocidad de la luz? Como resultado se deduce en particular que el tiempo no es 'absoluto', es decir, independiente del sistema inercial. Más aún, aparece una ley de movimiento que difiere de la de Newton para altas velocidades y el teorema  $E = mc^2$  de equivalencia entre la masa inercial y la energía  $E$  de un sistema, teorema que ha resultado particularmente importante en la teoría de los elementos químicos y de los procesos radiactivos.*

Las reacciones iniciales a la teoría de la relatividad no fueron todas alentadoras. El ya mencionado Planck fue el primero en prestarle apoyo y, de hecho, fue uno de los iniciadores del estudio de la dinámica relativista en 1906. La contribución del antiguo profesor de Einstein, Hermann Minkowski, que en esa época estaba en Göttingen, fue decisiva. Dándose cuenta de la estructura de la teoría einsteiniana afirmarí en 1908: “de ahora en adelante el espacio y el tiempo por sí mismos están destinados a hundirse entre las sombras y sólo una especie de unión entre ambos retendrá una existencia independiente”. Había nacido el espacio de Minkowski, el espacio-tiempo, en el que el tiempo pasaría a ser la ‘cuarta dimensión’, tras las tres dimensiones espaciales. El intervalo,  $s^2 = c^2t^2 - (x^2 + y^2 + z^2)$ , que determina la métrica de Minkowski y que incluye, a la vez, al espacio y al tiempo, es la “especie de unión que retiene una existencia independiente”. La formulación tetradimensional del espacio-tiempo de Minkowski apareció –también en los *Annalen*– en 1915, seis años después de su muerte. Aunque la métrica de Minkowski fue en cierta medida anticipada por Poincaré en 1906, Minkowski dio un paso trascendental al iniciar la formulación moderna de la relatividad sobre una variedad espaciotemporal y el estudio de sus tensores relevantes. De esta forma llevó a su generalización natural la idea de vector, cuya importancia había sido especialmente puesta de manifiesto por el matemático Felix Klein (1849-1925) en su famoso *Erlanger Programm* (1872).

Como consecuencia de la influencia de Minkowski, Einstein fue invitado junto con la crema de la ciencia europea –que entonces era casi tanto como decir mundial– al primer congreso de Solvay (1911), en Bélgica. Dos años antes había sido nombrado profesor asociado en Zurich tras la renuncia de su competidor, su amigo Adler, de modo semejante a como en 1669 renunciara el matemático Isaac Barrow a la cátedra Lucasiana de Cambridge (de la que fue su primer titular) en favor de Isaac Newton. Tras una corta estancia en la Universidad de Praga, Einstein pasó en 1912 a ser profesor del Politécnico de Zurich y en 1913, a instancias de Planck y Nernst (1864-1941, Nobel de química en 1920), fue nombrado director del Instituto Káiser Guillermo y miembro de la Real Academia Prusiana de Ciencias, con el rango de profesor –pero sin obligaciones docentes– y con un sueldo especial. El no tener la obligación de dar clases debió agradarle. Einstein era un mediano profesor: escribía con letra pequeña, hablaba mirando a la pizarra y generalmente no aclaraba las convenciones de símbolos salvo –para desesperación de sus pocos

alumnos— cuando resultaba innecesario, como con la velocidad de la luz  $c$  o con la constante de gravitación universal  $G$ . Einstein, por otra parte, no escribió textos en el sentido convencional de la palabra; las conferencias de Princeton de 1921 —*The meaning of relativity*— no constituyen propiamente un libro de texto. Los primeros estudiantes de relatividad utilizaban el libro de 1911 de Max von Laue (1879-1960), y, a partir de 1921, la excelente *Relativitätstheorie* del brillantísimo vienés Wolfgang Ernst Pauli (1900-58, Nobel de física de 1945), quien en 1924 introduciría el principio de exclusión para caracterizar el comportamiento de los electrones y en 1931 la existencia del neutrino. Einstein dijo de esa *Relativitätstheorie*: “quienquiera que estudie ese trabajo maduro y grandiosamente concebido no podrá creer que su autor es un joven de veintiún años” (Pauli lo escribió en su segundo año universitario).

Einstein se trasladó a Berlín en 1914. Los días de aislamiento de la comunidad científica habían concluido definitivamente; la fama popular le llegaría pocos años después. La guerra comenzó en agosto de ese mismo año. Durante ella, Einstein adoptó una actitud decididamente pacifista y, a pesar del conflicto bélico, consiguió crearse un ambiente recluso en el que seguir trabajando: Einstein publicó una treintena de trabajos en el período 1915-18. Utilizando el cálculo tensorial de Ricci y la geometría de Bernhard Riemann (1826-66), oportunamente puesta a punto en la segunda mitad del siglo XIX y para cuyo estudio contó de nuevo con la ayuda de Marcel Grossmann, desarrolló su teoría general de la relatividad, que había iniciado en Berna en 1907. En 1912 (año del que se conserva el manuscrito más antiguo de Einstein sobre relatividad) llegó a la conclusión de que una teoría de la gravitación debería basarse en un espacio-tiempo cuya geometría dependiera de la materia. Einstein completó su teoría en 1916. Bajo el nombre de *relatividad general* se oculta simplemente una teoría de la gravedad en la que los efectos gravitatorios se deben a la especial geometría del espacio-tiempo tetradimensional. Einstein, al reconocer la deuda contraída con la geometría *riemanniana*, diría de su creador: “sólo el genio de Riemann, solitario e incomprensido, había llegado a mediados del pasado siglo a una nueva concepción del espacio, en la cual había sido desprovisto de su rigidez y en la que era posible reconocer su capacidad de tomar parte en los acontecimientos físicos”. Por eso la teoría de la relatividad general es, en realidad, una dinámica del espacio-tiempo físico.

El gran matemático David Hilbert (1862-1943) se interesó por la teoría de la gravitación tras una visita de Einstein a Göttingen en el verano de 1915. Durante algún tiempo se consideró que Hilbert, que propuso unas ecuaciones esencialmente equivalentes a las ecuaciones de campo de Einstein, pudo haberse anticipado por cuestión de días. Einstein envió su artículo a publicar el 25-XI-1915 (apareció el 2-XII-1915); Hilbert sometió el suyo a la revista el 20-XI-1915 (se publicó el 31-III-1916), tras enviar una copia a Einstein poco antes. Su lectura provocó una pequeña polémica epistolar en Nov-Dic-1915 en la que Einstein sostuvo que Hilbert trataba de apropiarse de su teoría: dada su talla matemática, Hilbert la habría entendido en el acto, mientras que la formulación de Hilbert no sería tan transparente para Einstein. Recientemente,

sin embargo, se han encontrado las galeradas originales (de fecha 6-XII-1915) del artículo de Hilbert, lo que ha permitido comprobar que el original era diferente de la versión que finalmente se publicó; en particular, no incluía las ecuaciones de campo. Así pues, Hilbert debió aprovechar las pruebas de imprenta para introducir modificaciones sustanciales, lo que deja la prioridad de Einstein claramente establecida que, por otra parte, Hilbert aceptó en la versión publicada de su trabajo: “las ecuaciones diferenciales de la gravitación que se obtienen están, me parece, de acuerdo con la magnífica teoría de la relatividad general establecida por Einstein en sus últimos artículos”. Si –como es hoy práctica usual– los editores de la revista hubieran añadido, tras la fecha de recepción del artículo de Hilbert, la mención ‘revisado’ en cualquier fecha posterior al 2-XII-1915, la cuestión de prioridad no se habría llegado a plantear. En cualquier caso, la acritud de Einstein con Hilbert duró poco, y el 20-XII-1915, ya antes de que apareciera el artículo de éste, Einstein le escribió: “ha habido un cierto resentimiento entre nosotros, cuya causa no quiero volver a analizar. He luchado contra esa amargura con completo éxito. De nuevo pienso en ti con amistad no ensombrecida y te pido que intentes lo mismo conmigo. Sería realmente una lástima que dos personas que en cierta medida se han liberado de este rastrero mundo no se complacieran el uno en el otro”.



La gente se acostumbró poco a poco a la idea de que la geometría del espacio era la realidad física última (Profesor A. Einstein)

[chiste de Rea Irving, en *The New Yorker*, 1929]

¿Cómo llegó Einstein a la relatividad general? En la teoría de la relatividad *especial* “había que conceder una especie de realidad absoluta al movimiento uniforme”. En consecuencia Einstein, siempre a la búsqueda de una visión unificada, se había preguntado: “¿cómo deben ser las leyes de la naturaleza, de modo que se apliquen a *cualquier* sistema de coordenadas?”. La teoría general de la relatividad “es una generalización de la especial que suprime la categoría especial de sistemas inerciales respecto de ... otros estados de movimiento ...; tiene su origen en el hecho, conocido desde hace siglos, de que la inercia y el peso del cuerpo están caracterizados por el mismo número, su masa”. De hecho, en el *Diálogo de las dos nuevas Ciencias*, Galileo ya había escrito que “la variación en el aire para bolas de oro, plomo, porfirio y otros materiales pesados es tan ligera... (que) tras haberla observado he llegado a la conclusión de que en un medio completamente desprovisto de resistencia todos los cuerpos caerían con la misma velocidad”. Newton también había comprobado la igualdad de la masa inercial y la gravitatoria con una precisión del 1%, utilizando péndulos de igual longitud y distinta composición, pero fue el barón húngaro Roland von Eötvös quien realizó experimentos ya muy precisos entre 1899 y 1908. Einstein, sin embargo, no los conoció hasta bastante después.

La admisión de la validez del principio de relatividad para sistemas que están acelerados los unos respecto de los otros conduce a la equivalencia entre el campo gravitatorio y la aceleración del sistema de referencia: ningún experimento, sea o mecánico no, puede distinguir entre un (pequeño) laboratorio acelerado en el espacio y su homólogo sobre la Tierra, éste sometido al campo gravitatorio. En su artículo del *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik* de 1907, en el que inicia la teoría general de la relatividad, Einstein concluye tras considerar dos sistemas de referencia –uno en reposo en un campo gravitatorio y otro uniformemente acelerado respecto del primero– que

*“no hay razón para suponer que ambos puedan distinguirse entre sí de forma alguna. Por ello supondremos una equivalencia física completa entre el campo gravitatorio y la correspondiente aceleración del sistema de referencia. Esta hipótesis extiende el principio de la relatividad [especial] al caso del movimiento traslacional uniformemente acelerado del sistema de referencia. El valor heurístico de esta hipótesis radica en el hecho de que un campo gravitatorio homogéneo puede ser reemplazado por un sistema de referencia uniformemente acelerado”.*

Así pues, Einstein establece en 1907 el principio de equivalencia entre la gravitación y la inercia. Einstein completó la teoría general de la relatividad con su artículo de 1916. Ese año, satisfecho tras su monumental trabajo, escribió a Pauli: a partir de ahora, “durante el resto de mi vida, quiero reflexionar sobre qué es la luz” (en una carta escrita pocos años antes de su muerte afirmó: “si alguien te dice que entiende lo que significa  $E = h\nu$ , dile que es

un mentiroso”). Es posible que, de no haber existido Einstein, no hubiera sido necesario esperar mucho para que alguien desarrollara la teoría especial de la relatividad; como hemos visto, los ingredientes esenciales estaban ya disponibles en 1905. Sin embargo, sólo el genio de Einstein pudo establecer en aquella época la teoría general, cuya validez esencial se mantiene en nuestros días. En efecto, aunque se han propuesto algunas modificaciones a la teoría de la gravitación, se admite generalmente que la teoría de la gravedad de Einstein no requiere especial revisión por motivos experimentales. Los problemas actuales más interesantes (sobre alguno de los cuales volveré al final) son cosmológicos —la cosmología es ya una ciencia experimental *cuantitativa*— y conciernen a la formación, estructura, geometría y futuro del universo: el delicado ajuste de las condiciones iniciales de la expansión/inflación, el cociente entre la densidad de materia del universo y la densidad crítica, el valor de la constante cosmológica, etc. Pero el problema teórico crucial —y conceptual— que está por resolver, y que desde hace tres cuartos de siglo constituye el objetivo fundamental de la física teórica, es la unión de la teoría de la gravitación con la física cuántica, sobre el que volveremos. Su resolución tendría implicaciones revolucionarias, hasta para la propia estructura y naturaleza del espacio-tiempo.

La teoría de Einstein daba lugar a una nueva ley de la gravedad que corregía la de Newton. ¿Cómo comprobarla? Se sabía ya —desde las observaciones de Urbain Leverrier (1811-77)— que el movimiento del planeta Mercurio, concretamente el avance de la precesión de su perihelio (el punto más próximo al sol), no se ajustaba del todo a la mecánica newtoniana. La discrepancia (un exceso de 43 segundos de arco por siglo respecto al cálculo newtoniano) resultó estar, para delicia de Einstein, en perfecto acuerdo con su teoría, que recibió así su primera y más importante verificación. Pero aquella contenía, además, una predicción espectacular: la luz también poseía ‘peso’, es decir, debía ser atraída y desviada por los cuerpos celestes. En efecto, si la equivalencia entre aceleración y gravedad se extiende también a los fenómenos electromagnéticos, los rayos de luz deben curvarse en presencia de un campo gravitatorio de la misma forma que aparecería curvado el haz luminoso de una linterna en un sistema acelerado. En 1916 el astrónomo inglés Sir Arthur S. Eddington (1882-1944) recibió, enviada por su colega holandés Willem de Sitter (1872-1934), una copia del trabajo de Einstein. Entusiasmado, comenzó a realizar los preparativos para dos expediciones, una a la isla de Príncipe, en el golfo de Guinea, y otra a la de Sobral, en la costa noreste del Brasil, destinadas a comprobar la predicción einsteiniana. Se trataba de aprovechar el eclipse solar del 29 de Mayo de 1919 para comparar la posición de una estrella con la observada al situarse al borde del sol. El eclipse era necesario para poder fotografiar la estrella cerca del sol —y por tanto observar la variación relativa de su posición al desviarse su rayo luminoso— sin que la potente luz solar lo impidiera. Eddington diría más tarde que la expedición —que tuvo lugar gracias a que la guerra mundial acabó oportunamente en el otoño de 1918— “no carecía de importancia internacional, pues puso fin a los intentos de boicotear

la ciencia alemana... Verificando la teoría del ‘enemigo’, nuestro observatorio mantuvo vivas las mejores tradiciones de la ciencia, dando una lección que quizá es necesaria en el mundo actual”. Tras la confirmación de la predicción de Einstein y su anuncio en la *Royal Astronomical Society* el 6 de Noviembre de 1919, el *Times* de Londres anunció al día siguiente: “Revolución en la ciencia –nueva teoría del universo– las ideas de Newton, derrocadas”. Einstein pasó instantáneamente a ser una figura pública, y ya no dejó de serlo hasta su muerte.

Es famoso el comentario de Einstein al telegrama del 27-IX-1919 con el que Lorentz –que estaba al tanto de la expedición– le anunciaba la segunda confirmación experimental de su teoría: “Ya sabía yo que la teoría era correcta”, afirmó. Alguien preguntó entonces: ¿Y si los resultados hubieran sido negativos? “Entonces lo sentiría por el buen Dios; la teoría *es* correcta”. Esta frase, altanera sólo en apariencia, pone de manifiesto la actitud einsteiniana ante la teoría física: en lugar de partir de una ley general resultante de la observación de hechos experimentales, Einstein procedía a formular una teoría para descubrir *después* si los hechos se ajustaban o no a ella: “cuando examino mis métodos de pensamiento llego a la conclusión de que mi don para la fantasía ha significado más para mí que mi capacidad de absorber el conocimiento positivo”. De este modo, y por nacer casi de la pura reflexión, la teoría se iniciaba con un contenido científico e incluso filosófico superior al que la sola observación de la experiencia hubiera requerido, y la belleza de la misma, reflejo de las hipótesis iniciales, se constituía en garantía de su veracidad.

Ernest Rutherford (1871-1937, Nobel –de química– en 1908), por ejemplo, dijo de la belleza de la teoría de la relatividad: “La teoría de la relatividad de Einstein, aparte de su validez, no puede menos que ser contemplada como una magnífica obra de arte”. La confianza que Einstein depositó en su teoría se puede medir por lo que escribió a Arnold Sommerfeld (1868-1951): “Te convencerás de la teoría general de la relatividad en cuanto la hayas estudiado. Por tanto no mencionaré una sola palabra en su defensa”. Paul A. M. Dirac (1902-84, Nobel de física en 1933) llega todavía más lejos y su opinión es especialmente interesante en este contexto. Planteándose la cuestión de si habría que rechazar la teoría einsteiniana si apareciera algún resultado experimental contrario a ella, comentó: “Yo diría que la respuesta a esta cuestión es un no rotundo. Quienquiera que sepa valorar la armonía fundamental existente entre el devenir del universo y los grandes principios matemáticos tiene que comprender que una teoría dotada de la belleza y la elegancia de la de Einstein ha de ser esencialmente correcta. La eventual aparición de una discrepancia en alguna de sus aplicaciones tiene que obedecer a alguna circunstancia que no se ha tomado adecuadamente en consideración, pero no puede atribuirse a los principios generales de la teoría”. La frase de Dirac sigue vigente: las modernas teorías supersimétricas de la gravedad son hoy objeto de intenso estudio por su belleza matemática, pese a la falta, por el momento, de todo apoyo experimental. Einstein afirmó en Oxford en 1933: “los conceptos y los

principios fundamentales de la física teórica son libres invenciones del intelecto humano”.

Tras la expedición de Eddington de 1919, Einstein adquirió instantáneamente renombre universal. “Para castigar mi desprecio por la autoridad, el Destino hizo una autoridad de mí mismo” afirmaría más tarde. En 1921 visitó los Estados Unidos por primera vez, donde se le hizo un recibimiento apoteósico; las universidades de todo el mundo compitieron por invitarle. En España estuvo diecisiete frenéticos días en Febrero-Marzo de 1923, primero en Barcelona, invitado por el *Instituto de Estudios Catalanes*, y después en Madrid, pasando a su regreso por Zaragoza. En cierta ocasión el físico P. Ehrenfest le preguntó por la razón de su visita a España en donde “no había física de interés para él”. “Sí -respondió Einstein- pero el rey da unas fiestas excelentes...”. La realidad es que la visita fue agotadora, con numerosas conferencias, entrevistas, reuniones privadas, honores y homenajes, entusiasmo público general generosamente reflejado en la prensa<sup>4</sup> y –también– alguna polémica. Científicos (Esteban Terradas, Blas Cabrera, Julio Palacios, Fernando Lorente de No, Santiago Ramón y Cajal, etc), políticos y hasta sindicalistas mantuvieron contactos con el ilustre huésped. Einstein aprovechó su estancia en Madrid para visitar Toledo, lo que hizo acompañado de José Ortega y Gasset, Bartolomé Cossío y Gregorio Marañón. Cuenta Ortega que pasó casi todo el tiempo en la sinagoga de Santa María la Blanca “soñando Dios sabe qué”. Ortega debió ser uno de los españoles de aquel tiempo capaces de comprender la trascendencia la teoría einsteiniana. En particular, no le pasó inadvertido (vid. *El tema de nuestro tiempo*) el aspecto *absoluto* (el carácter general o invariante de las leyes físicas) que, a pesar de su poco afortunado nombre, posee la teoría de la *relatividad*. Durante su visita a Madrid, en sesión presidida por Alfonso XIII, Einstein fue nombrado académico correspondiente de la *Real Academia de Ciencias*; habló en el *Ateneo* en un acto presidido por Marañón, dió charlas en el Seminario Matemático de la *Junta de Ampliación de Estudios* y una de divulgación en la famosa *Residencia de Estudiantes*, en la que Ortega actuó de traductor. Einstein no se distinguía por la claridad de sus exposiciones, ante lo cual, según contó Julio Palacios, “Ortega se encontró en un dilema: o traducía fielmente a Einstein, o sacrificaba la fidelidad a la claridad... y por ello debió actuar como un filtro del que siempre sale agua cristalina. Esto originó una amistosa y amena discusión entre el conferenciante y el traductor, que puso de manifiesto que Ortega se negaba a entender lo que no puede entenderse” (he de aclarar aquí que Palacios –excelente profesor– fue desgraciadamente un heterodoxo en cuestiones relativistas, lo que no impidió sus éxitos en otras áreas de la física).

---

<sup>4</sup>He aquí los titulares de tres editoriales de *El Sol: La relatividad de la vida, Banquetomanía, La significación de Einstein*. En un chiste de la época, alusivo a la sisa en los comercios, dice Einstein: “estos españoles van a hacer fracasar mi teoría porque aquí venden la luz falta de peso”.

La situación personal de Einstein, sin embargo, comenzaba a ser difícil en Alemania. En 1919 había escrito en el *Times* esta ‘aplicación’ de la relatividad: “Hoy soy descrito en Alemania como un sabio alemán y en Inglaterra como un judío suizo. Si mi destino fuera convertirme en *bête noire*, resultaría ser un judío suizo para los alemanes y un sabio alemán para los ingleses”. Sus predicciones fueron ciertas: en 1922, temiendo por su vida, tuvo que abandonar temporalmente Berlín. Pronto la campaña antisemita se extendió a las ideas de Einstein. Incluso un premio Nobel de física (1905), Philipp Lenard (quien se afiliaría al partido nazi), se alzó en contra suya, y en Leipzig se publicó un libro titulado *100 autores contra Einstein* criticando –ridículamente– la relatividad. “Si estuviera equivocado, un solo profesor hubiera sido suficiente”, comentaría Einstein irónicamente. Ya tres siglos antes, Galileo había afirmado: “en cuestiones científicas la autoridad de mil hombres no vale lo que el razonamiento de un solo individuo”. Es interesante notar que no sólo en Alemania encontró la teoría de la relatividad dificultades por motivos políticos: todavía en 1952 fue considerada por un académico soviético como contraria al materialismo dialéctico, de forma semejante como había sido condenada la genética de Mendel y Morgan y perseguidos implacablemente por Stalin sus seguidores (en época más reciente, también los geólogos partidarios de la tectónica de placas tuvieron dificultades en la antigua Unión Soviética). Einstein escribió en 1923: “en el reino de los buscadores de la verdad no existe autoridad humana. Quien quiera desempeñar el papel de magistrado se hundirá ante las carcajadas de los dioses”.



Albert Einstein en Esplugas de Francolí durante su visita a España en 1923

Tras rechazar varias ofertas de trabajo en universidades europeas (entre otras, de la entonces Universidad Central de Madrid), Einstein partió de Berlín en 1932 para otra visita a los Estados Unidos con su segunda esposa, su prima Elsa, con la que se había casado en 1919 tras divorciarse de Mileva. Nunca más volvería a Alemania. Poco después de la subida de Hitler al poder en 1933 escribió: “Mientras tenga libertad de elección, sólo permaneceré en un Estado

cuyas libertades políticas, tolerancia e igualdad de los ciudadanos ante la ley sean norma... tales condiciones no existen actualmente en Alemania”. Un año antes había expresado su repulsa a la Rusia soviética por razones semejantes. Tras renunciar a la ciudadanía alemana –que sin abandonar la suiza había recuperado tras la primera guerra mundial– presentó en 1933 su dimisión en la Academia de Ciencias Prusiana. En un ‘auto de fe’ nazi, celebrado en Mayo de ese año, los libros de Einstein (junto con los de Sigmund Freud, Emil Ludwig y otros autores) fueron quemados públicamente en la plaza de la Ópera berlinesa y, en una anticipación de medio siglo al *1984* de George Orwell, la voz ‘Einstein’ en la enciclopedia alemana fue rectificada para decir: “destituído en 1933 de su puesto de Director del Instituto Káiser Guillermo y privado de la ciudadanía alemana. Desde entonces vive en el extranjero”.

Einstein nunca perdonó a los alemanes. Cuando en 1949 fue invitado a reanudar su relación con el *Instituto Káiser Guillermo*, rebautizado *Instituto Max Planck*, Einstein rehusó. Ese mismo año se negó, también, a ser nombrado hijo predilecto de Ulm, su ciudad natal.

### 3 EINSTEIN, LA MÉCANICA CUÁNTICA Y SU PENSAMIENTO FILOSÓFICO

*Entia non sunt multiplicanda praeter necessitatem* (los entes de razón no deben aumentarse sin necesidad)

Guillermo de Occam, ‘*doctor invincibilis*’, 1285-c.1349.

*We are to admit no more causes to natural things than such as are both true and sufficient to explain their appearances*

Newton en el libro tercero de los Principia, 1687

*Everything should be made as simple as possible, but not simpler*

Einstein

*Gott würfelt nicht* [Dios no juega a los dados]

Einstein

*¡Deja ya de decir a Dios lo que ha de hacer!*

Niels Bohr, a Einstein

En 1933 Einstein se instaló definitivamente en Princeton (Estados Unidos) y en 1940 adquirió la nacionalidad estadounidense. En el famoso *Instituto de Estudios Avanzados* de Princeton trabajó durante 22 años dedicando gran parte de su esfuerzo a meditar sobre la naturaleza de la física cuántica y, sobre todo, a la búsqueda de una teoría unificada de la gravitación y del electromagnetismo. Pero el éxito no le acompañó esta vez (“lo que Dios ha separado, no lo una el hombre”, decía Pauli con ironía); sus mayores contribuciones a la ciencia quedaron en Europa.

¿Cuáles fueron éstas? Indudablemente la relatividad especial (1905), la general (1907 y 1916) junto con sus aplicaciones a la cosmología (iniciadas en 1917) y las contribuciones a la teoría cuántica por las que recibió el premio Nobel. Su actitud respecto a la mecánica cuántica arroja mucha luz sobre la concepción einsteiniana de la naturaleza y la realidad física, por lo que merece algún comentario.

La física clásica (y ésta incluye a la relatividad) distingue perfectamente entre el observador y lo observado: en toda experiencia pueden separarse el objeto de la misma y el aparato de medida. Esta separación, sin embargo, no es factible en el mundo de las partículas atómicas. No es muy difícil comprender esta situación. Si se quiere contemplar un cuadro colgado en la pared, basta con iluminarlo; es obvio que el cuadro no se va a alterar por ello. Pero si lo que desea observar es un electrón, la luz que lo ‘ilumine’ (un fotón) perturbará su estado. La situación es en cierto modo semejante a la de alguien que quisiera conocer dónde se encuentra una bola de billar sobre una mesa a oscuras y sólo dispusiera para ello de otra bola: cuando oye el sonido del golpe sabría también que había perturbado la bola que deseaba observar. Toda observación requiere una interacción y, en el mundo microscópico, donde la constante de Planck  $h$  es ya apreciable pese a la pequeñez de su valor ( $h = 6.62 \cdot 10^{-34} J.s.$ ), esa interacción no puede ignorarse.

Por otra parte, y como Einstein mismo había puesto de manifiesto, la luz no se comporta siempre como una onda, sino que a veces presenta aspectos discretos que después quedarían caracterizados en términos de *fotones*, los ‘corpúsculos luminosos’. Esta dualidad partícula-onda de la radiación fue extendida a los cuerpos materiales por el aristócrata Louis de Broglie (1892-1987, Nobel de Física en 1929) en su revolucionaria tesis de 1924, cuya importancia fue Einstein de los primeros en apreciar. En virtud de la hipótesis de de Broglie, la materia (un electrón, por ejemplo) posee aspectos ondulatorios de la misma forma que la luz los posee corpusculares. La hipótesis de de Broglie fue confirmada en 1927 por C.J. Davisson y L.H. Germer en Estados Unidos y por G.P. Thomson en Inglaterra. Éste recibió el Nobel en 1937 por mostrar los aspectos *ondulatorios* del electrón (realizó una experiencia de difracción de electrones) mientras que su padre, J.J. Thomson, lo había recibido antes, en 1906, por descubrir esa *partícula* en 1897.

Ante esa dualidad partícula-onda, imposible de entender clásicamente, cabe preguntarse: ¿qué aspecto caracteriza a un electrón? ¿Se trata de una onda o de un corpúsculo? El danés Niels Bohr (1885-1962, Nobel de física

de 1922), quizá influido por el *pragmatismo* de William James, resolvió la situación por medio del principio de complementariedad: ambas descripciones, corpuscular y ondulatoria, son complementarias, y es la experiencia la que determina cuál de esos aspectos se pone de manifiesto. En 1947 se le concedió a Bohr la orden danesa del Elefante, para cuyo escudo escogió al Yin y Yan chinos junto con la leyenda *Contraria sunt complementa*, en doble y evidente alusión a su principio de complementariedad. La conexión entre ambos aspectos viene dada por la interpretación probabilística propuesta por Max Born (1872-1970, Nobel de física de 1954) para la función de onda que describe el comportamiento ondulatorio de la materia, solución de la ecuación que Erwin Schrödinger (1887-1961, Nobel de física en 1933) introdujo en 1926.

Las consideraciones anteriores evidencian el papel especial que la medida desempeña en los fenómenos cuánticos. El observador ‘contribuye’ a determinar el aspecto que percibe: el dispositivo experimental condiciona el resultado que se va a obtener dando lugar a descripciones complementarias. He aquí un *Gedankenexperiment* (experimento imaginado), debido al físico estadounidense John Archibald Wheeler (1910-), que puede ilustrar esta situación. Supongamos que una persona está tratando de averiguar una palabra realizando un cierto número de preguntas a las que se le responde afirmativa o negativamente. Su interlocutor, sin embargo, no ha seleccionado previamente palabra alguna y se limita a responder sí o no indiferentemente con tal de tener en el instante de la respuesta una palabra que sea adecuada a esa respuesta y a todas las anteriores. Cuando el interrogatorio comienza, quien ha de adivinar la palabra supone que ésta existe de la misma forma que el físico que va a realizar una experiencia presume que hay una ‘realidad’ que va a ser objeto de observación. Sin embargo, la palabra que finalmente adivina aparece como consecuencia de las preguntas que él mismo ha formulado; si las preguntas cambian, también cambia la palabra. De modo análogo, la descripción obtenida del mundo físico aparece como resultado de la experiencia efectuada; si se realizan distintas experiencias se obtienen distintas ‘realidades’. Como dice el propio Wheeler, “ningún fenómeno es un fenómeno hasta que se observa”.

Como consecuencia de un detallado análisis del proceso de medida en el mundo microscópico, Werner K. Heisenberg (1901-76, Nobel de física en 1932) formuló en 1927 su famoso *principio de indeterminación*: no es posible conocer *simultáneamente* la posición y el movimiento (más exactamente, el impulso) de una partícula con precisión *ilimitada*. Este sencillo enunciado oculta una revolución tan extraordinaria, al menos, como la pérdida del carácter absoluto del tiempo newtoniano en la relatividad einsteiniana. En efecto, si el presente no puede ser conocido con precisión absoluta en la medida, ¿cómo predecir el futuro? La idea de estricta causalidad, tan cara a la física, desaparece; en su lugar, entra la noción de probabilidad, y será ésta la que se propague causalmente.

La introducción de la probabilidad implica un cambio radical en la descripción y estudio del fenómeno físico. En efecto, cuando al lanzar una moneda al aire decimos que hay una probabilidad del 50% de que salga “cara” y otra igual

de que resulte “cruz” estamos en realidad renunciando a hacer una predicción absolutamente precisa: conociendo con suficiente exactitud el modo de lanzar la moneda, la distancia de caída, la resistencia del aire, etc., podríamos conocer con certeza cómo va a caer. Por el contrario, cuando en física atómica se afirma que un átomo de radio 226 tiene una probabilidad del 50% de desintegrarse en 1620 años, estamos diciendo todo lo que somos capaces de decir; no hay modo de saber si un átomo determinado se desintegrará antes o después. La única predicción que puede hacerse es *estadística*.

El conflicto que plantea esta descripción puede resolverse si se admite que no es posible extrapolar las leyes del mundo macroscópico al microscópico –del que nuestra experiencia ordinaria nada nos dice– y se considera la interacción observador-objeto como la realidad última. Por supuesto, las limitaciones cuánticas a la medida también afectan al mundo macroscópico. Pero debido al pequeño valor de la constante de Planck, las limitaciones prácticas se deben a la imprecisión del aparato de medida, mucho mayor que la insoslayable indeterminación cuántica. La situación es semejante a la relación que existe entre las dos mecánicas, newtoniana y einsteiniana: la primera es utilizable mientras las velocidades de los objetos no se aproximen a la de la luz, unos  $300.000\text{km/s}$ . Nuestra experiencia cotidiana nada nos dice, por tanto, de la mecánica relativista. De hecho, cabe considerar ambas mecánicas, einsteiniana y cuántica, como *deformaciones* de la newtoniana y de la clásica respectivamente; por ejemplo, el grupo de Poincaré que determina la simetría relativista es una deformación del grupo de Galileo, el grupo de simetría de la mecánica newtoniana. La dificultad que nos presentan la mecánica relativista einsteiniana y la física cuántica sería mucho menor si pudiéramos desplazarnos a velocidades semejantes a las de un electrón en un acelerador y tuviéramos microscopios electrónicos en lugar de ojos, lo que obviamente no es el caso. La dificultad inicial estriba, pues, en que los aspectos relativistas y cuánticos de la Naturaleza son inaccesibles para nuestros sentidos (aunque no siempre, como en el fenómeno cuántico del helio líquido), que sólo son capaces de percibir el límite newtoniano y clásico (no obstante, cabe mencionar que las recientes ideas del Nobel (1999) Gerardus 't Hooft (1946-) podrían conducir a una relación más sutil entre la física clásica y la cuántica).

Einstein, sin embargo, opinaba que la teoría cuántica –y debido en particular a su carácter estadístico– proporcionaba una descripción *incompleta* de la realidad, y por tanto constituía tan sólo un estadio intermedio hacia otra teoría más completa. En el quinto congreso de Solvay, en 1927, Einstein planteó discretamente su disconformidad. Entre otros premios Nobel de física (que ya lo eran o lo serían en el futuro) estaban allí de Broglie, Bohr, Dirac, Heisenberg, Planck y Schrödinger, todos ellos directamente relacionados con la aparición de la *nueva mecánica*. En el siguiente congreso de Solvay, en 1930, lo hizo ya con energía; sus discusiones con Niels Bohr planteando experimentos imaginarios que podrían violar el principio de incertidumbre de Heisenberg son justamente célebres. Pero Bohr –tras tener que meditar un buen rato, incluso toda la noche– siempre encontraba el error en la argu-

mentación de Einstein, utilizando a menudo ¡las propias teorías de Einstein! Heisenberg cuenta, recordando aquellas discusiones, que en cierto momento Paul Ehrenfest dijo: “Einstein, me avergüenzas; argumentas contra la teoría cuántica como tus adversarios contra la relatividad”. Pese a todo, Einstein nunca aceptó (como tampoco lo hicieron Schrödinger, de Broglie y Planck) la interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica, quedándose cada vez más aislado de la comunidad de los físicos teóricos. En un famoso trabajo de Princeton de 1935 sobre el que volveremos, firmado por Einstein, B. Podolsky y N. Rosen, se planteaba la siguiente pregunta: ¿puede considerarse completa la descripción de la realidad que proporciona la mecánica cuántica? para afirmar a continuación: “en una teoría completa hay un elemento correspondiente a cada elemento de realidad. Condición suficiente para la realidad de una magnitud física es la posibilidad de predecirla con certeza, sin perturbar el sistema”. Y en una carta de 1944 a Born, Einstein decía, aludiendo al carácter probabilístico de la teoría cuántica: “Tú crees en un Dios que juega a los dados, y yo en una ley y orden completos en un mundo que objetivamente existe... Incluso los grandes éxitos iniciales de la teoría cuántica no me hacen creer en ese juego fundamental de dados, aunque soy consciente de que nuestros jóvenes colegas interpretan mi actitud como un síntoma de senilidad”. “Dios es sutil, pero no malicioso” (*Raffiniert ist der Herrgott, aber boshaft ist Er nicht*) gustaba de decir Einstein para indicar que la naturaleza oculta su misterio tras su grandeza, pero no maliciosamente.

Las dos posturas mencionadas difieren de modo irreconciliable en la visión de lo que constituye la ‘realidad física’. Heisenberg, uno de los máximos exponentes de la ‘interpretación de Copenhague’, la resumió así: “Nosotros no hemos supuesto que la teoría cuántica, en contraposición a la teoría clásica, es esencialmente una teoría estadística en el sentido de que sólo se puedan hacer predicciones estadísticas a partir de datos exactos... En la formulación de la ley causal, es decir, en la afirmación ‘si conocemos el presente exactamente, podemos predecir el futuro’ no es la conclusión sino más bien la premisa la que es falsa. No es posible conocer ... el presente en todos sus detalles”. Por el contrario, de Broglie afirmaba en un prólogo en 1957: “Podemos aceptar que la actitud adoptada durante 30 años por los físicos teóricos cuánticos es, al menos en apariencia, la contrapartida exacta de la información que la experiencia nos da en el mundo atómico. En el nivel actualmente alcanzado por la investigación en la microfísica ... , las perturbaciones introducidas por el experimento, imposibles de eliminar,... permiten sólo predicciones estadísticas. La construcción de las fórmulas puramente probabilísticas que todos los teóricos usan actualmente estuvo pues plenamente justificada. Sin embargo, la mayoría de ellos, a menudo bajo la influencia de ideas preconcebidas derivadas de la doctrina positivista, han pensado que podían ir más allá y afirman que el carácter incompleto e incierto del conocimiento (actual) de lo que realmente sucede en la microfísica es el resultado de una indeterminación real de los estados físicos y su evolución. Tal extrapolación no parece justificada en modo alguno. Es posible que en el futuro, observando la realidad física a un nivel más profundo,

seamos capaces de interpretar las leyes de probabilidad y de la física cuántica como los resultados estadísticos de valores de variables perfectamente determinadas que actualmente están ocultas para nosotros... la historia (de la ciencia) nos muestra que el estado actual del conocimiento es siempre provisional y que debe haber, más allá de lo que es conocido actualmente, inmensas regiones por descubrir”.

La interpretación de Copenhague u ‘ortodoxa’ es actualmente la admitida por la mayoría de los físicos y, en la práctica, utilizada por todos. Ciertamente ningún resultado experimental requiere su modificación, aunque quizá el clima de insatisfacción respecto de la lógica de algunos aspectos de la mecánica cuántica haya renovado el interés por su estructura interna. Ésta se revela cada vez más sorprendente, como en las fascinantes propiedades de los estados ‘entrelazados’ que mencionaré después, y que el propio Einstein consideró en 1935, antes de que tuvieran nombre, en su crítica a la física cuántica ortodoxa. De hecho, Einstein rechazó hasta su muerte la visión de Copenhague de la realidad física. He aquí algunas de sus muchas manifestaciones en este sentido:

*Difiero resueltamente en mis opiniones acerca de los fundamentos de la física de casi todos mis contemporáneos, y por lo tanto no puedo permitirme actuar como portavoz de los físicos teóricos. En particular, no creo en una formulación estadística de las leyes. [A Carl Seelig, biógrafo suyo].*

*Comprendo perfectamente que me tomes por un viejo pecador obstinado, pero también me doy cuenta de que no comprendes cómo he recorrido mi solitario camino. Seguramente te divertiría mucho, aunque te sería imposible apreciar mi actitud. También yo tendría un gran placer en destruir tu punto de vista filosófico-positivista. [A Max Born, a quien se debe la interpretación probabilística de la función de onda de Schrödinger].*

*Aún puedo aceptar, si nos ponemos en lo peor, que Dios pueda haber creado un mundo en el que no existan leyes naturales. En otras palabras, un caos. Pero que haya leyes estadísticas con soluciones determinadas, es decir, leyes que obliguen a Dios a echar los dados en cada caso individual, lo encuentro completamente desagradable. [A James Franck, premio Nobel en 1925 por sus estudios sobre los choques entre electrones y átomos].*

Por supuesto, Einstein siempre aceptó el uso de la teoría cuántica como una herramienta extraordinariamente útil y precisa; su objeción era que no podría considerarse, aún, una teoría ‘completa’. Hubiera sido interesantísimo, sin embargo, conocer la reacción de Einstein a la comprobación de la violación –por muchos experimentos desde finales de los setenta– de las desigualdades de Bell (1964), violación que, como veremos, zanja esencialmente de forma experimental la polémica Einstein-Bohr en contra de Einstein.

Pese a todo, no cabe más que admirar la tenacidad de Einstein en defensa del determinismo y de la existencia de una realidad física independiente del observador. De él y su actitud dijo Julius Robert Oppenheimer (1904-67) en 1966: “tenía derecho a fracasar esta vez... Empleó muchos años en intentar probar que la teoría cuántica era inconsistente. Nadie pudo ser más ingenioso que él imaginando (contra)ejemplos inesperados, pero el hecho es que no había tal inconsistencia, y a menudo la solución estaba en trabajos anteriores del propio Einstein... Tras sus fallidos esfuerzos, Einstein afirmarí, simplemente, que no le gustaba la teoría: no le gustaban las componentes de incertidumbre... ni el abandono de la causalidad... Ver estas nociones perdidas, aunque él mismo había puesto con sus trabajos el puñal en la mano del asesino, fue muy duro para él”. Probablemente contribuyó a ello el hecho de que la filosofía positivista y operacionalista que subyace en la mecánica cuántica ortodoxa fue, en gran parte, introducida en la física por el propio Einstein (a través, por ejemplo, de su insistencia en la ‘definición operacional’ de la simultaneidad en la teoría de la relatividad), influido por Ernst Mach, aunque más tarde renegara de éste y de aquélla.

¿A qué doctrina, epistemológicamente hablando, se adhirió Einstein? Inicialmente, cabe calificar a Einstein de positivista. La *Historia de la mecánica* de Mach le impresionó mucho en su época de estudiante, en la que también fue influido por el empirista escocés David Hume (1711-76), que “estudió con fervor y admiración antes de descubrir la teoría de la relatividad” y sin el cual “es muy posible que... no hubiera encontrado la solución”. Pero aunque Einstein llegó a firmar un manifiesto en apoyo de una *Sociedad de Filosofía Positivista* en 1911 (junto con Mach, los matemáticos David Hilbert y Felix Klein, Sigmund Freud y otros), se alejó de esa filosofía poco después de concluir la teoría de la relatividad general en 1916, precisamente el año de la muerte de Mach. La relatividad general es una *teoría de campos* (concretamente, del campo gravitatorio) y, por tanto, difícilmente encajable en la epistemología de Mach. De hecho, en su respuesta a los comentarios de científicos y filósofos sobre su propia ‘necrológica’ –nombre con el que Einstein se refería irónicamente a la autobiografía que escribió en 1949– afirmó: el científico “debe resultar al epistemólogo sistemático como una especie de oportunista sin escrúpulos: aparece como realista en la medida en la que pretende describir un mundo independiente del proceso de percepción; como idealista en la medida que considera los conceptos y las teorías como libres invenciones del espíritu humano (no deducibles lógicamente de los datos experimentales); como positivista en tanto que considera que sus conceptos y teorías están justificadas sólo en la medida en que proporcionan una representación lógica de relaciones entre experiencias sensoriales. Puede incluso parecer un platonista o un pitagórico en tanto que considera que el punto de vista de la sencillez lógica constituye una herramienta indispensable y eficaz en sus investigaciones”.

Einstein pertenece al nutrido grupo de físicos teóricos (que cuenta con muchos otros ilustres miembros, como P.A.M. Dirac o C.N. Yang) que considera que las ideas y las leyes básicas de la ciencia no pueden extraerse solamente de

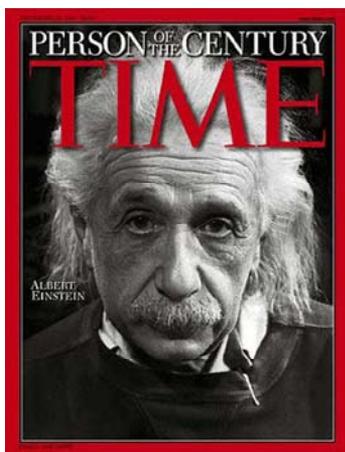
la experiencia. Lejos queda ya el célebre *hypotheses non fingo* de los *Principia* de Newton, quien expresaba así su convicción –tampoco exacta– de que los conceptos básicos de su sistema estaban directamente extraídos de la Naturaleza. En contraste, en opinión de Einstein, el físico teórico está cada vez más obligado a guiarse por consideraciones puramente matemáticas y formales. A este respecto, vale la pena citar aquí lo que escribió en 1960 el premio Nobel de física Eugene P. Wigner (1902-1995) sobre ‘la irrazonable eficacia de las matemáticas’ en la descripción de la Naturaleza: “el milagro de la adecuación del lenguaje matemático para la formulación de las leyes de la física es un regalo maravilloso que ni entendemos ni merecemos; deberíamos estar agradecidos por él. Confío en que seguirá siendo útil en la investigación futura y que se extenderá, para bien o para mal, para nuestra delicia e incluso quizá para nuestro asombro, a otras ramas del conocimiento”. Más aún: en opinión de Einstein, “el teórico que sigue ese camino [formal y matemático] no debe ser considerado caprichoso, sino que debe permitírsele dar rienda suelta a su imaginación, ya que no hay otro camino para conseguir el objetivo”. Este objetivo no lo fija el método científico, aunque sí proporciona los medios para conseguirlo. Por supuesto, según Einstein, “una teoría tiene una ventaja muy importante si sus conceptos básicos e hipótesis fundamentales están próximos a la experiencia”. Ello confiere una mayor confianza en la teoría, ya que “se requiere mucho menos tiempo y esfuerzo para descartar esa teoría por la experimentación”. En otras palabras: la teoría es más fácilmente refutable (‘falsable’) en el sentido del filósofo Karl Popper (1902-94). No obstante, para Einstein, “conforme aumenta la profundidad de nuestro conocimiento, hay que abandonar cada vez más estas ventajas en nuestra búsqueda de simplicidad y uniformidad en los fundamentos de la teoría física”.

A la vista de todo lo que antecede, se comprende que no sea posible encuadrar globalmente a Einstein dentro de ninguna de las tendencias típicas –positivismo, empirismo, idealismo, racionalismo o cualquier otro ‘ismo’– en las que podrían ser incluidos otros científicos. Los grandes creadores no encajan en parcelaciones simplistas. Como dijo el físico Ehlers, quizá la caracterización que mejor le cuadre sea la de “artista lógico-empírico”. Y es que, desde la perspectiva einsteiniana aquí descrita, no cabe duda de que la ciencia es, también, una manifestación artística: las grandes leyes y teorías científicas tienen la belleza y la armonía de las mejores obras de arte.

#### 4 EINSTEIN, PERSONAJE PÚBLICO

Ningún científico ha gozado de una fama tan universal como Einstein. Preguntado una vez por su profesión, respondió sin titubear: “modelo masculino”, aludiendo a la atención que le dedicaban los fotógrafos. La revista *Time* lo declaró su ‘personaje del siglo XX’. Ciertamente es que sólo unos pocos entre los millones que le rindieron tributo comprendían la trascendencia de sus descubrimientos y que muchos de sus admiradores, atraídos sólo por lo

misterioso, hubieran quedado decepcionados de haberlos entendido. Y es que, por desgracia, a la mayoría de los seres humanos les atrae más lo fantástico que lo racional, y prefieren aceptar simplezas sin fundamento que esforzarse en comprender explicaciones, especialmente si no son fáciles. La sorprendente supervivencia de la astrología, la quiromancia y otras creencias tan arcaicas como irracionales constituye una buena prueba de ello.

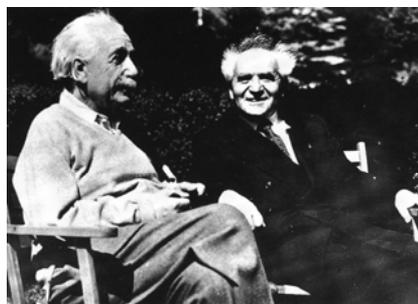


El hecho de ser judío fue un factor determinante en la vida de Einstein. Parece ser que recibió el nombre de Abraham en su circuncisión, nombre que sus padres cambiaron después por el de Albert por comenzar por la misma letra. Aunque su familia no ocultaba su judaísmo, tampoco era particularmente observante de sus tradiciones: su padre, por ejemplo, consideraba las reglas de la comida *kosher* como supersticiones anacrónicas. En palabras de Einstein, su familia era “completamente irreligiosa” y, como hemos visto, de niño fue incluso a un colegio católico. No obstante, Einstein tuvo una época infantil de profunda religiosidad –en la que leía la Biblia con avidez y se negaba a tomar nada que no fuera *kosher*– que se interrumpió brusca-

mente al cumplir 12 años. Su primera identificación con su condición judaica fue en Praga, de cuya universidad alemana fue nombrado profesor en 1911: en aquella época, la del emperador Francisco José, un profesor universitario debía pertenecer a algún credo –aunque sólo fuera para poder realizar adecuadamente el juramento de lealtad– y, forzado a ello, Einstein se declaró entonces judío (‘de fe mosaica’). Pero fue en Alemania donde descubrió claramente su identidad: “cuando vivía en Suiza no me di cuenta de mi judaísmo; todo cambió cuando me trasladé a Berlín”. El judaísmo de Einstein, no obstante, tenía un carácter más ético que religioso: “para mí, el judaísmo está casi exclusivamente relacionado con la actitud moral ante la vida”. Y es que el judaísmo –en opinión algo optimista de Einstein– “no es un credo: el Dios judío es simplemente la negación de la superstición, un resultado imaginario de su eliminación”. Por lo que se refiere a sus propias creencias, Einstein afirmaba: “Creo en el Dios de Espinoza que se manifiesta en la armonía ordenada de todo lo que existe, no en un Dios que se preocupa del destino y las acciones de los seres humanos”. “No creo en el libre albedrío. Las palabras de Schopenhauer ‘el hombre puede hacer lo que quiere, pero no puede decidir qué es lo que quiere’ me acompañan en todas las situaciones de mi vida y me reconcilian con las acciones de los demás... Esta conciencia de la falta de libertad me impide tomar a mis congéneres y a mí mismo demasiado en serio...”. “A mí me basta... con el conocimiento... de una mínima parte de la Razón que se manifiesta en la Naturaleza”.

Como consecuencia de su identificación con el pueblo judío durante su estancia en Berlín, Einstein se hizo ferviente sionista a partir de 1919, tras algunas dudas iniciales. Distinguiendo –de modo algo sutil– entre nacionalismo y sionismo, afirmó: “Soy contrario al nacionalismo pero estoy a favor del sionismo”. También manifestó su “confianza en el éxito del desarrollo de la colonia judía” y su alegría porque hubiera “una diminuta mota en esta tierra donde los miembros de nuestra tribu no sean extranjeros”. Conforme su fama fue aumentando, su vinculación a la causa sionista fue cada vez mayor. Su apoyo a la creación de la Universidad Hebrea, por ejemplo, fue decisivo: en su viaje a los Estados Unidos de 1921 le acompañó Chaim Weizmann, que era un químico de prestigio (y entonces presidente de la *Organización Sionista*), con objeto de recabar fondos para esa universidad, aunque después no siempre estuvo de acuerdo con él ni con la Universidad Hebrea. Weizmann jugó un papel muy importante en la creación del Estado de Israel en 1948, del que fue su primer presidente.

Su apoyo a la causa judía –aunque sus opiniones sobre el sionismo no fueran siempre compartidas por los judíos de Palestina– motivó que a la muerte de Weizmann, David Ben-Gurion (1886-1973) sugiriera a Einstein como siguiente presidente de Israel. Einstein declinó el ofrecimiento (que, de aceptar, hubiera contado con la segura aprobación del *Knesset* israelí) que le fue transmitido por Abba S. Eban, entonces embajador en Estados Unidos. “Conozco algo sobre la



Einstein y Ben-Gurion

Naturaleza, pero prácticamente nada sobre los hombres” afirmó, estableciendo así un criterio que, de aplicarse, dejaría a un buen número de Estados sin su cabeza visible. Cabe preguntarse, como me comentó en 1979 el ilustre hispanista y entonces presidente de Israel, Dr. Navón, las consecuencias que hubiera tenido para Israel que Einstein hubiera aceptado la oferta.

Einstein fue toda su vida un pacifista convencido. Desde sus tiempos escolares en el *Luitpold Gymnasium*, el militarismo le resultaba odioso: “el que se siente en condiciones de marchar con placer, codo con codo, al son de la música marcial, ha recibido un cerebro grande sólo por equivocación, puesto que le hubiera bastado con la médula espinal”. Al comienzo de la primera guerra mundial, por ejemplo, rehusó tener nada que ver con el Manifiesto al mundo civilizado en el que 93 intelectuales alemanes, el gran y caballeroso Planck entre ellos, trataban de justificar la posición alemana; fue un gran mérito de Einstein no dejarse arrastrar por la corriente general y saber mantenerse al margen. El pacifismo de Einstein, sin embargo, no le impidió sentirse después beligerante –como a tantos otros pacifistas– cuando estuvo en peligro la libertad. Por eso firmó, a instancias de Leo Szilard y en presencia de Edward

Teller (1908-1993), ambos físicos de origen húngaro (nacidos en Budapest), la famosa carta que a título personal envió al presidente de Estados Unidos, Franklin D. Roosevelt, el 2 de agosto de 1939. Reproduzco aquí, por su importancia histórica, los párrafos más significativos:

*Recientes trabajos de E. Fermi y L. Szilard, que me han sido comunicados en forma manuscrita, me inclinan a pensar que el elemento uranio puede convertirse en una nueva e importante fuente de energía en el futuro inmediato. Ciertos aspectos de la situación requieren vigilancia y, si fuera necesario, rápida actuación por parte de la Administración. Creo, por tanto, que mi deber es llamar su atención sobre los hechos y recomendaciones que siguen.*

*En el transcurso de los cuatro últimos meses se ha hecho probable –gracias al trabajo de Joliot en Francia y Szilard en América– la posibilidad de desatar reacciones en cadena en una gran masa de uranio, por lo que se generarían vastas cantidades de energía... Este nuevo fenómeno conduciría también a la construcción de bombas... Una sola bomba de ese tipo... podría muy bien destruir un puerto entero junto con parte del territorio circundante.*

*... Tengo entendido que Alemania ha suspendido actualmente la venta de uranio procedente de las minas de Checoslovaquia de las que se ha apoderado. El hecho... podría quizás comprenderse si se tiene en cuenta que el hijo del Subsecretario de Estado alemán, von Weizsäcker, pertenece al Instituto Káiser Guillermo de Berlín, donde están siendo repetidas parte de las investigaciones americanas sobre el uranio”.*

La carta no llegó a Roosevelt hasta Octubre, quien respondió que juzgaba la información remitida de gran importancia. Poco después se creaba el *Comité Asesor sobre Uranio*; el resto es bien conocido. Lo que es menos conocido es que también existió, del lado alemán, *otra carta*: el 24 de Abril de 1939, tres meses antes que Einstein, los científicos de Hamburgo Paul Harteck y Wilhem Groth habían enviado al Ministerio de la Guerra alemán un mensaje que incluía este párrafo: “*En nuestra opinión, es probable que los más recientes desarrollos de la física nuclear hagan posible la producción de un explosivo más poderoso que los convencionales en muchos órdenes de magnitud*”.

Einstein nunca formó parte del *Comité Asesor sobre Uranio* ni tuvo relación con el desarrollo del proyecto Manhattan, que se desarrolló en el laboratorio de Los Álamos, dirigido por Oppenheimer. Tras la rendición alemana, muchos de los científicos que participaron en el proyecto de construcción de la bomba atómica trataron de detenerlo sin éxito. Szilard, por ejemplo, que había convencido a Einstein para que escribiera a Roosevelt, escribió informe tras informe para evitar que la bomba fuera lanzada sobre los japoneses. El famoso memorándum (11 Junio 1945) del comité presidido por James Franck (que incluía a Szilard) consideraba “que podrían lograrse mucho mejores condiciones

para conseguir un acuerdo [de paz] si las bombas nucleares fueran mostradas al mundo en un lugar inhabitado adecuadamente escogido” de forma que provocara la rendición del Japón sin pérdida de vidas. Sin embargo, un panel asesor de científicos (presidido por J. R. Oppenheimer, e incluyendo a E. Fermi, E.O Lawrence y A. Compton) diría días después que “no se veía alternativa aceptable al uso militar” de la bomba, y la trágica eficacia de *Little Boy* y *Fat Man* fue finalmente comprobada sobre Hiroshima y Nagasaki el 6 y el 9 agosto de 1945.

Albert Einstein  
Old Grove Rd.  
Massau Point  
Peconic, Long Island

August 2nd, 1939

F.D. Roosevelt,  
President of the United States,  
White House  
Washington, D.C.

Sir:

Some recent work by E.Fermi and L. Szilard, which has been communicated to me in manuscript, leads me to expect that the element uranium may be turned into a new and important source of energy in the immediate future. Certain aspects of the situation which has arisen seem to call for watchfulness and, if necessary, quick action on the part of the Administration. I believe therefore that it is my duty to bring to your attention the following facts and recommendations:

In the course of the last four months it has been made probable - through the work of Joliot in France as well as Fermi and Szilard in America - that it may become possible to set up a nuclear chain reaction in a large mass of uranium, by which vast amounts of power and large quantities of new radium-like elements would be generated. Now it appears almost certain that this could be achieved in the immediate future.

This new phenomenon would also lead to the construction of bombs, and it is conceivable - though much less certain - that extremely powerful bombs of a new type may thus be constructed. A single bomb of this type, carried by boat and exploded in a port, might very well destroy the whole port together with some of the surrounding territory. However, such bombs might very well prove to be too heavy for transportation by air.

-2-

The United States has only very poor ores of uranium in moderate quantities. There is some good ore in Canada and the former Czechoslovakia, while the most important source of uranium is Belgian Congo.

In view of this situation you may think it desirable to have some permanent contact maintained between the Administration and the group of physicists working on chain reactions in America. One possible way of achieving this might be for you to entrust with this task a person who has your confidence and who could perhaps serve in an inofficial capacity. His task might comprise the following:

a) to approach Government Departments, keep them informed of the further development, and put forward recommendations for Government action, giving particular attention to the problem of securing a supply of uranium ore for the United States;

b) to speed up the experimental work, which is at present being carried on within the limits of the budgets of University laboratories, by providing funds, if such funds be required, through his contacts with private persons who are willing to make contributions for this cause, and perhaps also by obtaining the co-operation of industrial laboratories which have the necessary equipment.

I understand that Germany has actually stopped the sale of uranium from the Czechoslovakian mines which she has taken over. That she should have taken such early action might perhaps be understood on the ground that the son of the German Under-Secretary of State, von Weizsäcker, is attached to the Kaiser-Wilhelm-Institut in Berlin where some of the American work on uranium is now being repeated.

Yours very truly,

*A. Einstein*  
(Albert Einstein)

October 19, 1939

My dear Professor:

I want to thank you for your recent letter and the most interesting and important enclosure.

I found this data of such import that I have convened a Board consisting of the head of the Bureau of Standards and a chosen representative of the Army and Navy to thoroughly investigate the possibilities of your suggestion regarding the element of uranium.

I am glad to say that Dr. Sachs will cooperate and work with this Committee and I feel this is the most practical and effective method of dealing with the subject.

Please accept my sincere thanks.

Very sincerely yours,

(signed) Franklin D. Roosevelt

Einstein dijo después que “si hubiera sabido que los alemanes no iban a poder desarrollar la bomba atómica, no hubiera hecho nada por ella” y que “hubiera preferido ser fontanero”. ¿Demasiado tarde? Es difícil valorar la responsabilidad de Einstein en la aparición de la bomba atómica, y no éste el lugar para discutir, como León Tolstoy en su magnífica novela *Guerra y Paz*, la posible importancia de pequeños acontecimientos en el curso de una guerra. Es harto probable que sin las cartas de Einstein todo hubiera seguido un curso semejante; en 1940, por ejemplo, Rudolf Peierls –después Sir Rudolf, entonces otro huido de Alemania nazi– también alertó a los británicos sobre la posible viabilidad de un explosivo atómico. El temor de que Alemania lo consiguiera antes era la preocupación general: la fisión del uranio había sido descubierta por Otto Hahn (1879-1968, Nobel de química en 1944) y Fritz Strassmann en el Instituto Káiser Guillermo en 1938. Pero, aunque probablemente Heisenberg había entendido perfectamente las bases para obtener material fisionable para construir una bomba atómica (el 26 de febrero de 1942 dio una charla titulada ‘Fundamentos físicos para obtener energía de la fisión del uranio’, a la que siguieron otras dos a altos oficiales del ejército alemán el 4 de junio 1942 –a la que asistió Albert Speer– y el 6 de mayo de 1943), los alemanes nunca estuvieron cerca de alcanzarla. Las grabaciones secretas realizadas en Farm Hall (una casa de campo cerca de Cambridge), donde los británicos mantuvieron recluidos a Heisenberg, Hahn, von Weizsäcker, von Laue, Harteck y otros durante seis meses, incluyendo agosto de 1945, muestran el asombro de los científicos alemanes ante las noticias de la bomba de Hiroshima, al darse cuenta de que habían estado muy por detrás de los aliados. Cabe también especular sobre si Heisenberg, que dirigió el programa alemán *Uranverein*, no pudo o no quiso poner un arma terrible en manos de los nazis, y sobre los motivos de su misteriosa visita a su antiguo maestro y amigo Niels Bohr, en un Copenhague ya ocupado por Alemania, en septiembre de 1941. Bohr recibió a Heisenberg cortésmente, y la conversación entre los dos –de la que realmente poco se sabe y menos aún con certeza– debió tener todos los elementos de un drama; ambos debieron sentir una gran frustración ante un destino que les había situado en circunstancias tan trágicas como distintas. En su diálogo se mezclaría la camaradería entre viejos conocidos y científicos excepcionales con la imposibilidad de hablar con libertad, el deseo y la necesidad de penetrar en la mente del otro con la inevitable desconfianza y la consiguiente incomunicación. De hecho, el famoso encuentro fue usado por Michael Frayn para la trama de *Copenhague*, estrenada en Londres en 1998.

Tras la guerra, Einstein dedicó toda su influencia y su prestigio a advertir a la humanidad del riesgo de un holocausto nuclear. Dos días antes de su muerte firmó un manifiesto en contra de la guerra, dirigido a todos los científicos del mundo, promovido por el filósofo, matemático y pacifista Bertrand Russell (1872-1970), que daría origen a las Conferencias de Pugwash. El manifiesto, publicado después de su muerte, formulaba esta pregunta: *¿vamos a poner fin a la raza humana o renunciará la Humanidad a la guerra?* El temor de que, como Cartago tras la tercera guerra púnica, la Humanidad pudiera desaparecer

tras la tercera guerra mundial –la cuarta será con hachas de piedra, decía Einstein– le persiguió hasta su muerte, que acaeció el 18 de abril de 1955. Cuando Newton murió, sus restos fueron depositados tras solemnes exequias en la abadía de Westminster, junto con los de los más ilustres hijos del Reino Unido. Por expreso deseo de Einstein, su funeral fue sencillo e íntimo, y sus cenizas depositadas en algún lugar desconocido, quizá el río Delaware.

¿Dónde radicó la esencia del genio de Einstein? Él mismo había manifestado en ocasiones que su cerebro debería ser utilizado con fines científicos. Durante la autopsia le fue extraído y, cortado en unas 240 piezas, permaneció durante años en un jarro en poder del patólogo que se la practicó. En 1985 fue estudiado por primera vez por neuroanatomistas de la Universidad de Berkeley y, en 1999, la revista científica *The Lancet* publicó el primer estudio anatómico detallado por científicos de la universidad canadiense McMaster. El cerebro de Einstein es de un peso (1230 gramos) ligeramente inferior al promedio, pero no parece haber una especial relación entre peso del cerebro e inteligencia: por ejemplo, el cerebro de Anatole France pesaba 1017 grs., y el de Iván Turgenev 2012 grs. Sin embargo, los investigadores de McMaster encontraron que los lóbulos parietales, importantes en el razonamiento espacial y matemático (esencial, por ejemplo, en la formulación de la teoría de la relatividad), eran más grandes y simétricos en el cerebro de Einstein que en cerebros de personas de edad parecida. Se encontró también que la cisura de Silvio y los opérculos parietales estaban prácticamente ausentes, algo que quizá permitiera una conexión nerviosa más eficaz y, por tanto, una mayor inteligencia, de acuerdo con ideas que se remontan a Santiago Ramón y Cajal (1832-1934). Quién sabe; el conocimiento de la base neurobiológica de los procesos cerebrales que determinan la consciencia y el razonamiento está aún en su infancia, aunque existe una correlación entre ciertas funciones cognitivas y la estructura de las áreas del cerebro que median en esas funciones. En cualquier caso, algo sí se sabe, y desde hace milenios: como dijo el propio Einstein, “el desarrollo mental del individuo y su modo de formar los conceptos depende del lenguaje hasta un nivel muy elevado... En este sentido, pensamiento y lenguaje están unidos entre sí”. No en vano el término griego *logos* designaba a la vez pensamiento, palabra, concepto y, también, razón. Y es que expresarse mal es pensar mal, un problema mucho más serio, hoy y siempre, de lo que parece.

## 5 EPÍLOGO

En este artículo nos hemos ocupado de Einstein y sobre todo de su física aunque, por limitaciones de espacio, ni siquiera de toda ella; tal es la amplitud de sus descubrimientos. Quedaron sin mencionar contribuciones muy importantes, como sus aportaciones a la física estadística, una de las cuales fue la predicción de un nuevo estado de materia, el condensado de Bose-Einstein, cuya comprobación experimental para un gas de átomos alcalinos le valió el Nobel de 2001 a E. H. Cornell, C. E. Wieman y W. Ketterle. En un gas muy

frío, con una temperatura muy cercana al cero absoluto ( $-273.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), las funciones de onda de las partículas próximas se solapan, y acaban formando una única función de onda común a todos los átomos: el condensado de B-E, un estado coherente de mínima energía en el que los átomos están en total sintonía. Hoy se habla de la estadística cuántica de Bose-Einstein para referirse al comportamiento estadístico de los bosones (como el fotón), término introducido por Dirac en honor a Satyendranath Bose (1894-1974), físico de Calcuta. Bose envió a Einstein un artículo de cuatro páginas (*La ley de Planck y la hipótesis de los cuantos de luz*, 1924), donde deducía estadísticamente la ley de Planck de la radiación, con la petición de que lo tradujera al alemán y lo publicara. Einstein reconoció inmediatamente su importancia, y publicó después él mismo varias ampliaciones del trabajo de Bose. La teoría del máser (*microwave amplification by stimulated emission of radiation*), descubierto en 1954 por Charles H. Townes (1915-, Nobel 1964), y del láser (*light amplification by stimulated emission of radiation*) por Theodore Maiman (1927-) en 1960, está basada en la estadística de Bose-Einstein para un gas de fotones, y los coeficientes que determinan la emisión láser llevan el nombre de Einstein, que los introdujo.

Tampoco he descrito los titánicos esfuerzos de Einstein para aunar la gravitación con el electromagnetismo, ni los trabajos del alemán Theodor Kaluza (1885-1954) y el sueco Oscar Klein (1894-1977) relacionados con esa búsqueda. Kaluza envió en 1919 un artículo a Einstein cuyo título, *Sobre el problema de la unidad de la física (Zum Unitätsproblem der Physik)* es revelador de su contenido. Aunque Einstein apreció enseguida su importancia, lo retuvo inexplicablemente casi dos años, hasta que él mismo lo comunicó a una revista para su publicación en 1921. El propio Einstein escribió un trabajo en esa línea en el que tuvo que citar -a petición del editor de la revista- un artículo previo de Klein. Kaluza y Klein son los precursores del uso de un número de dimensiones superior a las cuatro del espacio-tiempo que experimentamos directamente, algo hoy habitual en las modernas teorías de cuerdas.

Dejando de lado las demás contribuciones de Einstein, me gustaría concluir con algún breve comentario en torno a cómo su física pervive en la de hoy, limitándome a dos aspectos: la física cuántica y la cosmología. Tras sus revolucionarios éxitos en los años veinte, la física cuántica atraviesa hoy, sin duda, una segunda revolución. Ya comenté las objeciones de Einstein a su interpretación ortodoxa, cristalizadas en el artículo 'EPR' de 1935 con Podolsky y Rosen. El problema radica en que, en la interpretación de Copenhague, la mecánica cuántica describe una pareja de objetos entrelazados ('entangled', 'intrincados', 'enmarañados' o, simplemente, 'EPR') como un único sistema cuántico global. El nombre (*Verschränkung*) lo acuñó Schrödinger en 1935, precisamente para indicar esa falta de separabilidad. Ésta se da incluso si los objetos están muy alejados, lo que confiere a la mecánica cuántica un carácter no local (no separable) que desafía toda intuición: el controvertido colapso de la función de onda, si se considera un proceso físico real, parece requerir

la existencia de las ‘acciones a distancia’ desterradas por la relatividad. Las desigualdades introducidas en 1964 por el irlandés John Bell (1928-1990) –que quizá hubiera recibido el premio Nobel de vivir algunos años más– han permitido realizar una comprobación experimental de la cuestión suscitada por EPR (Bell incluye la ‘hipótesis de localidad’, que requiere la ausencia de interacción no local entre los aparatos de medida), con lo que la elección entre la epistemología cuántica de Bohr y la de Einstein ha dejado de ser una cuestión filosófica para ser decidible experimentalmente. La violación de las desigualdades de Bell ha puesto de manifiesto que el ‘entrelazamiento’ de dos partículas (por ejemplo, de dos fotones) no puede entenderse como una correlación convencional en la que las propiedades comunes de dos objetos, resultado de una preparación igualmente común, permanecen vinculadas a cada uno de ellos tras su separación como integrantes de su realidad física, como sucedería con el grupo sanguíneo común de dos gemelos univitelinos. De otra forma: no es posible entender las propiedades de los estados entrelazados en el esquema que preconizaba Einstein, de acuerdo con sus ideas de una realidad física, causal, y localizada en el espacio y en el tiempo. No es que la mecánica cuántica sea inaceptable; es el mundo físico el que es extraordinariamente peculiar.

Así pues, la naturaleza –el último juez– se resiste a dar la razón a Einstein en su larga polémica con Bohr. Sin embargo, el análisis de la fundamentación de la mecánica cuántica, una cuestión aparentemente desligada de toda aplicación práctica, ha dado lugar a una serie de experimentos cruciales y a la introducción de los estados EPR en muchas aplicaciones prácticas, como la información cuántica. La criptografía cuántica –codificación segura porque cualquier espía se delataría necesariamente, ya que toda medida cuántica perturba el estado– es ya una realidad, y quizá lo sea en un futuro la computación cuántica, basada en *q-bits* (*quantum bits*). Ésta sería más eficaz, pues –contrariamente a lo inicialmente supuesto– la complejidad de un problema, como la factorización en números primos, no es independiente del tipo de ordenador utilizado. Otros desarrollos de la mecánica cuántica, que implican términos como ‘saltos cuánticos’ (observados experimentalmente incluso para un único ión), ‘decoherencia’ (inexistencia de estados que sean superposición de estados macroscópicos y que se invoca para resolver la paradoja del famoso gato de Schrödinger, vivo y muerto a la vez), ‘condensados de Bose-Einstein’ etc., muestran que la física cuántica está lejos de ser una teoría cerrada. La segunda revolución cuántica llevará, como la primera, a espectaculares avances tecnológicos pero, también, podría conducir a una nueva comprensión de la teoría cuántica, lo que constituiría una postrera reivindicación de Einstein.

Otra área de la física que se ha desarrollado extraordinariamente, desde que Einstein estableció la teoría de la gravitación, es la astrofísica y la cosmología. Para empezar, al igual que las ecuaciones de Maxwell del electromagnetismo predecían la existencia de las ondas electromagnéticas que descubrió Hertz, las ecuaciones del campo gravitatorio de Einstein implicaban la existencia de ondas gravitatorias. Su búsqueda comenzó en los sesenta con las experiencias de J. Weber, que pretendía detectarlas observando las pertur-

baciones que a su paso sufrirían grandes cilindros de aluminio, usados como antenas. Pero es ahora cuando esas ondas, perturbaciones del espacio-tiempo de origen diverso (consecuencia del movimiento de los pulsars –estrellas de neutrones que giran velozmente–, la explosión de supernovas o colisiones de agujeros negros) podrían detectarse directamente con la tecnología actual. Los laboratorios LIGO (*Laser interferometer gravitational wave observatory*) en los Estados Unidos y GEO 600 en Alemania utilizan la interferometría láser para observar el paso de una onda gravitacional, pues ésta cambiaría ligeramente la longitud que han de recorrer los rayos láser, haciéndose así observable. Sin embargo, ya hay pruebas indirectas de su existencia: J. H. Taylor y R. A. Hulse recibieron el premio Nobel de 1993 por observar en 1974 la influencia de las ondas gravitacionales en el comportamiento de un pulsar binario, PSR 1913+16, cuyo período orbital decrece al perder energía por emisión de radiación gravitacional. Las mediciones coinciden con las previsiones de la relatividad general con una aproximación del 0'5%, lo que se considera como prueba de la realidad de las ondas gravitacionales predichas por las ecuaciones de Einstein.

El campo de la cosmología teórica moderna lo inauguró el propio Einstein en 1917. Ese año, Einstein y el astrónomo holandés Willem de Sitter mostraron que las ecuaciones de campo podían usarse para describir el universo. Einstein, como sus coetáneos, creía que el universo era estático, pero sus ecuaciones daban lugar a una solución que correspondía a un universo en expansión. Para evitarla, introdujo en ellas el llamado término cosmológico, que incluye la constante de igual nombre. En 1922 el ruso Aleksandr Friedmann (1888-1925) publicó una solución de las ecuaciones (sin término cosmológico) para un universo en expansión en un artículo al que seguía un comentario –crítico– de Einstein. Pero en 1929 el astrónomo Edwin Hubble (1889-1953) descubrió que las galaxias distantes se alejaban entre sí y de la nuestra con una velocidad proporcional (a través de la ‘constante de Hubble’) a su distancia. Como consecuencia, Einstein concluyó que la adición del término cosmológico a sus ecuaciones de campo constituía “el mayor error de su vida”, y renegó de él. Sin embargo, la presencia o no de ese término, y su delicado –delicadísimo– ajuste numérico, ha pasado a ser una cuestión fundamental para la física de hoy. ¿Hay que invocar el llamado principio antrópico para justificar ese ajuste? Este principio subvierte la lógica usual: explica a posteriori, y no parece ser refutable en el sentido de Popper al no hacer predicciones contrastables, lo que lo hace inaceptable (al menos, para muchos científicos, entre los que me incluyo). Por otra parte, desde finales de los noventa, la observación ha confirmado que en los últimos cinco mil años la expansión del universo se está acelerando. Un redivivo término cosmológico podría dar cuenta de esa aceleración. El nuevo ‘término cosmológico’ tendría igual estructura matemática, pero no la misma interpretación física, que el de Einstein. Éste estaba colocado en el miembro izquierdo de sus ecuaciones de campo, el de carácter puramente geométrico que Einstein llamaba ‘de cristal’; el nuevo término cosmológico estaría a la derecha de la igualdad, en el miembro que describe la materia o ‘de barro’, según su apreciación estética. Un término que dé cuenta de la aceleración de

la expansión debería estar ahí situado, para producir el efecto contrario al que daría lugar si estuviera situado a la izquierda. Pero, además, su carácter ‘de barro’ refleja otro hecho importante. Indica que no es un término ‘geométrico’: correspondería a una nueva densidad de energía, quizá a la energía del vacío cuántico (que estimó por primera vez Yakov Zel’dovich en 1967) asociada a la ‘energía oscura’. Entender estas cuestiones constituye hoy un problema crucial pues, si no se conoce el origen de la energía que presumiblemente acelera la expansión del universo, será imposible conocer su evolución: a la ‘gran explosión’ (*big bang*) podría sucederle, si la aceleración de la expansión no se detiene, el ‘gran desgarró’ (*big rip*), final de galaxias, estrellas, planetas y hasta de los átomos, que acabarían disociándose al superar la aceleración de la expansión a todas las fuerzas de la naturaleza, incluida la nuclear. En estos momentos se estima, según datos de la WMAP (*Wilkinson microwave anisotropy probe*, de la NASA), que el 73% del universo está compuesto de ‘energía oscura’, el 23% de ‘materia oscura’ (materia que no emite radiación visible, cuya presencia fue ya puesta de manifiesto en 1933 por F. Zwicky) y un 4% –sólo– de materia bariónica (ordinaria). La presencia de energía y materia oscuras es inferida a través del efecto de su gravitación sobre la materia ordinaria pero –por ahora– hay en esto más oscuridad que conocimiento, y el problema de la constante cosmológica sigue siendo uno de los fundamentales de la física teórica.

Los agujeros negros (término que introdujo Wheeler en 1967) son, también, predicción y consecuencia –soluciones– de las ecuaciones de Einstein, aunque inicialmente no se reconocieran como tales. Constituyen un ejemplo más de cómo la física de Einstein fue más lejos que su creador: Einstein no sólo fue escéptico de su existencia, sino hostil a la idea misma, pues creía que las soluciones de agujeros negros podrían evitarse con una mejor formulación de la teoría. La observación ha ido más allá y el telescopio Hubble, en órbita desde 1990, ha encontrado muchos candidatos. Por ejemplo, nuestra Vía Láctea orbita alrededor de *Sagittarius A\**, un agujero negro supermasivo (de masa igual a la de 3’7 millones de soles), y recientemente se ha encontrado otro de masa ‘intermedia’ (1300 soles) orbitando a tres años luz alrededor de su gigantesco vecino; podría haber un ejambre de diez mil agujeros negros más. Se especula, también, con la existencia de mini-agujeros negros (‘primordiales’). Todo comienza con la solución (1916) de Karl Schwarzschild (1876-1916), que luego correspondería a un agujero negro sin rotación y sin carga, y que el propio Einstein presentó en su nombre a la Academia Prusiana de Ciencias. A ésta siguió enseguida la de Reissner-Nordström (que correspondería a uno cargado). Mucho después, en 1963, el neozelandés Roy Kerr encontró otra solución, asociada a un agujero negro que gira (la de Schwarzschild es el caso particular de rotación cero). En pocos años en torno a 1970, Werner Israel, Brandon Carter y Stephen Hawking (1942-) mostraron que la masa, el momento angular y la carga bastan para caracterizar un agujero negro estacionario: en la terminología algo críptica de Wheeler, probaron que ‘los agujeros negros no tienen pelo’, lo que pretende indicar que están tan ‘estandarizados’ como las partículas elementales. Finalmente, tras observar Hawking en 1974 que,

cuánticamente, esos agujeros no son tan negros pues emiten radiación, quedó establecido un nuevo gran campo de estudio: la *física* de los agujeros negros.

También aquí se hace necesaria una descripción cuántica de la gravedad. Ésta es, asimismo, la finalidad de las elegantes teorías de supercuerdas, la teoría *M*. Lo poco que se sabe de ella es que es geométrica, multidimensional, unificadora y quizá única, y *muy* matemática, propiedades todas ellas en línea con los gustos de Einstein. La fascinante observación de A. Strominger y C. Vafa (1996) del origen microscópico de la fórmula ‘termodinámica’ de Bekenstein-Hawking (1973,1976) para la entropía ( $1/4$  de la superficie en unidades naturales) de ciertos agujeros negros, contando configuraciones de cuerdas y ‘D-branas’, no debería ser casual (*a fluke*, que diría Dirac), aunque siempre ayude conocer previamente el resultado final. El ‘principio holográfico’ de ‘t Hooft (1993) y L. Susskind (1995), por su parte, relaciona aspectos de la geometría del espacio-tiempo con el número de los estados de la materia, por lo que toda teoría que lo incluya debe unificar la gravedad y la mecánica cuántica. Los ideales einsteinianos de unificación, así como de comprensión profunda de la física cuántica, reaparecen aquí en la búsqueda de un maridaje de la gravedad y la teoría cuántica, aunque ya se habla menos de la “inminencia de la teoría del todo” (exceso que, hoy, pasa factura a nuestro gremio de físicos teóricos). Entre tanto, y desde hace medio siglo, la relatividad *especial* y la teoría cuántica ya constituyen una sola teoría, la *teoría cuántica de campos* que, en su actual forma de *modelo estándar* –a su vez una teoría unificada de las interacciones salvo la gravedad– ha cosechado incontables éxitos en la descripción del comportamiento de las partículas elementales. El hallazgo de la *teoría cuántica de la gravedad* –al que pronto seguirían otros matrimonios menos conflictivos– determinará, sin duda, el próximo *annus mirabilis* de la física.

¿Cuál es el legado de Einstein? El antiguo oficial de patentes patentó, a su vez, una docena de dispositivos, como un voltímetro muy sensible (1908), una bomba refrigeradora estanca para uso doméstico (con Szilard, 1930) que no llegó a utilizarse pero que hoy es la base de la que propulsa el sodio que se utiliza como refrigerante en algunos reactores nucleares, y un dispositivo fotoeléctrico para regular automáticamente el tiempo de exposición de una cámara fotográfica (1936). Pero, por supuesto, son sus extraordinarios y puramente teóricos descubrimientos los que están detrás de incontables avances tecnológicos. Este hecho, las innumerables aplicaciones prácticas de los descubrimientos teóricos de Einstein, *fruto exclusivo de su curiosidad*, es algo que deberían tener en muy cuenta quienes consideran que la investigación debe ser, sobre todo, práctica, pues a toda gran revolución conceptual le sigue siempre, inexorablemente, una gran revolución tecnológica. Las válvulas electrónicas, las células fotovoltaicas, los transistores, los circuitos integrados, los ordenadores, la superconductividad y la superfluidez, el láser (de luz y, también ya, atómico), la comunicación por fibras ópticas, la medicina ‘nuclear’, la óptica cuántica, los relojes de altísima precisión, los condensados de Bose-Einstein, la nanotecnología, la información y computación cuánticas, sin olvi-

dar la física atómica y las bases de toda la química, junto con un larguísimo etcétera, dependen de la física cuántica, fruto de la mente de Einstein y de otras igualmente curiosas. La relatividad especial es esencial en cuanto se consideran altas velocidades, como en los aceleradores de partículas; por su parte, la relatividad general es necesaria en la medición de muchos fenómenos celestes, en la comprensión del universo y en cualquier problema cosmológico. Pero también tiene aplicaciones algo más mundanas, como a los sistemas de localización GPS (*global positioning system*), cuya precisión sería imposible sin tener en cuenta las correcciones por gravedad y velocidad en los satélites que se usan para la triangulación. La lista de las tecnologías que se basan más o menos directamente en algún avance einsteiniano es, realmente, interminable.

Concluimos ya. Todas las *ideas* fundamentales de la física moderna – relatividad, teoría cuántica, cosmología– nacieron en el primer cuarto del siglo XX. La contribución de Einstein a esas ideas fue mayor que la de cualquier otro científico. Por ello –y debido a la estructura social del mundo en el que le tocó vivir– poseyó un público como ningún otro científico ha tenido nunca, y se solicitaron frecuentemente sus opiniones sobre religión, filosofía, política y otros temas, opiniones que no fue remiso en emitir y, en ocasiones, de modificar con el curso del tiempo. En ellas demostró una penetración, independencia e integridad fuera de lo común, aunque tuvo que enfrentarse a situaciones y disyuntivas de extremada gravedad, que casi nadie ha tenido que encarar. En ningún campo, sin embargo, realizó ninguna aportación comparable a las que hizo en el de la física, a la que dedicó lo mejor de su actividad. Así, sus ideas sobre la imperiosa necesidad de ‘un gobierno mundial’ son más propias de un espíritu utópico que de un conocedor de las sociedades humanas. Hubiera sido interesante conocer su opinión sobre el *1984* de George Orwell, quien tenía una visión más sombría de los supergobiernos, si tuvo oportunidad de leerlo: *1984* se publicó en 1949, sólo seis años antes de la muerte de Einstein. Resulta también extraño, y más en un científico, que entre sus muchas consideraciones sobre la naturaleza humana no hubiera ninguna alusión a las consecuencias que para esa naturaleza supone la evolución. De hecho, el nombre de Darwin aparece mencionado en la recopilación *Mis ideas y opiniones* una sola vez, creo, y marginalmente. Sin embargo, su lugar prominente en la historia está garantizado por sus extraordinarias contribuciones a la ciencia y por ser, junto con Newton, uno de los dos físicos más grandes que han existido. Por ello, si Einstein viviera hoy, contemplaría con satisfacción cómo la física moderna ha realizado prometedores avances en el camino de la teoría unificada y de la geometrización de la naturaleza que tanto buscó él, y cómo la teoría cuántica, que nunca le convenció debido a su carácter probabilístico, está atravesando una segunda revolución cuyo resultado final aún no es predecible.

Cien años después de su *Annus mirabilis*, la ciencia continúa explorando el universo de Einstein. Los problemas que él no pudo resolver determinan, todavía hoy, la frontera del conocimiento. Por ello, apenas entrados en un nuevo siglo, y ante la creciente trivialización del conocimiento y la cultura, es conveniente recordar lo que el propio Einstein afirmó en 1952 y que, sin duda,

le es aplicable a él mismo: “sólo hay unas cuantas personas ilustradas con una mente lúcida y un buen estilo en cada siglo. Lo que nos ha quedado de su obra es uno de los tesoros más preciados de la humanidad... No hay nada mejor para superar la presuntuosidad modernista”.

## REFERENCIAS

- [1] A. EINSTEIN, *La relatividad al alcance de todos*, Biblioteca Scientia, dirigida por J. Rey Pastor (1916, traduc. española de 1925)
- [2] A. EINSTEIN Y L. INFELD, *La física, aventura del pensamiento* (Losada, Buenos Aires, 1939)
- [3] P.A. SCHILPP (EDITOR), *Albert Einstein: philosopher-scientist*, vols I y II, Open Court Classics (1949).
- [4] C. P. SNOW, Einstein, en *Nueve hombres del siglo XX* (Alianza ed., 1969. Tít. original: Variety of men, 1996)
- [5] R. CLARK, *Einstein -the life and times N.Y.* (1971)
- [6] J. BERNSTEIN, *Einstein*, Fontana (1973)
- [7] B. HOFFMANN AND H. DUKAS, *Einstein*, Paladin (1975)
- [8] *Physics Today: Einstein centennial* (Marzo 1979)
- [9] *Einstein, 1879-1979*, Jewish National and University Library, Berman Hall, Jerusalén, (1979)
- [10] A.P. FRENCH (EDITOR), *Einstein, A centenary volume*, Heinemann (1979)
- [11] A. PAIS, *El señor es sutil...*, Ariel (1984; trad.esp. de *Subtle is the lord...*, Oxford Univ. Press, 1982)
- [12] *Bulletin of the Atomic Scientists: Einstein and peace* (Marzo 1979)
- [13] *Correo de la Unesco: Einstein* (Mayo de 1979)
- [14] J.M. SÁNCHEZ RON, *Relatividad especial, relatividad general. Orígenes, desarrollo y recepción por la comunidad científica*, ICE-UAB (1981)
- [15] T.F. GLICK, *Einstein y los españoles*, Alianza Ed. (1988)
- [16] J. STACHEL ET AL., *The collected papers of Albert Einstein*, I, II Princeton Univ. Press (1987,1989)
- [17] L. PYENSON, *El joven Einstein*, Alianza Universidad (1990; tít. original: *The young Einstein: the advent of relativity*, Adam Hilger, 1985)
- [18] L. NAVARRO VEGUILLAS, *Einstein, profeta y hereje*, Tusquets (1990)
- [19] M. WHITE Y J. GRIBBIN, *Einstein: a life in science*, Pocket Books (1993)
- [20] R. HIGHFIELD Y P. CARTER, *The private lives of Albert Einstein*, Faber and Faber, Londres (1993)

- [21] T. HEY Y P. WALTERS, *Einstein's mirror*, Cambridge Univ. Press (1997)
- [22] A. FÖLSING, *Albert Einstein, a biography*, Viking, N.Y. (1997)
- [23] A. EINSTEIN, *Mis ideas y opiniones*, Bon Ton (textos de Einstein de muy diversas fechas; ed. esp. 2000)
- [24] *Einstein en la red*: <http://www.aip.org/history/einstein/>

José A. de Azcárraga  
Dpto. de Física Teórica e IFIC (CSIC-UVEG)  
Facultad de Física  
Universidad de Valencia  
46100-Burjassot (Valencia)  
Correo electrónico: [j.a.de.azcarraga@ific.uv.es](mailto:j.a.de.azcarraga@ific.uv.es)  
Página en le red: <http://ific.uv.es/~mathepth>