

UN BUEN AÑO PARA LA FÍSICA: 2015 Y EL LEGADO DE ALBERT EINSTEIN (1879-1955)

J. Adolfo de Azcárraga¹

18-II-16

I. Introducción

Newton, Darwin y Einstein son, seguramente, los más grandes científicos de la historia. En esa selección influye que –matemáticas aparte– la física y la biología constituyen la base de todas las ciencias si se acepta, claro está, que la química es consecuencia del enlace químico y éste es el resultado de las leyes de la física cuántica. Dada la trascendencia de su descubrimiento, cabe mencionar también a James Watson y Francis Crick por descifrar en 1953 la estructura del DNA, cuya importancia en la copia del material genético “no les pasó inadvertida”, como no se olvidaron de puntualizar en su breve y fundamental artículo en *Nature*. Y en un plano muy diferente, no estrictamente científico, se encuentra Timothy Berners-Lee por crear, en 1989, la *world wide web* en el CERN. Internet ha producido, y continúa haciéndolo, una transformación social mucho más veloz, profunda y universal que la originada por Gutenberg en el s. XV (y de efectos no todos positivos). Todos los citados son físicos, por cierto, salvo Darwin y Watson, y todos ingleses, salvo el estadounidense Watson (que sí lo sería científicamente, pues trabajó en el famoso laboratorio Cavendish de física de la Univ. inglesa de Cambridge), y Einstein, que renegó de su nacionalidad alemana. Einstein se encontraba fuera de Alemania cuando Hitler tomó el poder en 1933 y nunca más regresó a ella. Dos años antes se había publicado en Leipzig el libro *Cien autores contra Einstein*, ante el que comentó: “si estuviera equivocado, un solo profesor bastaría”. Y, en mayo de 1933, en autos de fe acompañados de los inevitables portadores de antorchas, sus libros ardieron junto con muchos otros, sobre todo de autores judíos. Einstein detestó toda su vida el nacionalismo, que tildaba de “enfermedad de la humanidad”.

Es frecuente creer que los descubrimientos de Einstein fueron sólo de naturaleza teórica; ciertamente, es el físico teórico por excelencia. Sin embargo, también han generado incontables aplicaciones prácticas, pues a toda revolución conceptual le sigue *siempre* una gran revolución tecnológica, algo que deberían recordar quienes insisten en que la investigación debe ser fundamentalmente ‘práctica’: la primera condición para la aparición de ciencia aplicada es que haya, en primer lugar, ciencia. Pues, como decía Cajal, “¿habrá alguno tan menguado de sindéresis que no repare que allí donde los principios o los hechos son descubiertos brotan también, por modo inmediato, las aplicaciones?” Y efectivamente, el trabajo de 1905 que incluye la explicación del efecto fotoeléctrico, la primera gran contribución de Einstein a la física cuántica nacida en 1900, es la base de incontables aplicaciones. En una carta de mayo de 1905 a su buen amigo Conrad Habicht consideraba que ese artículo, “que trata de la radiación y las propiedades energéticas de la luz”, era “*muy revolucionario*”. De hecho, ese trabajo motivó la concesión del Nobel de 1921 a Einstein “por sus servicios a la física teórica y especialmente por el descubrimiento de la ley del efecto fotoeléctrico”.

¹Profesor emérito de la Univ. de Valencia y miembro del IFIC (CSIC-UV); j.a.de.azcarraga@ific.uv.es , <http://www.uv.es/~azcarrag> .

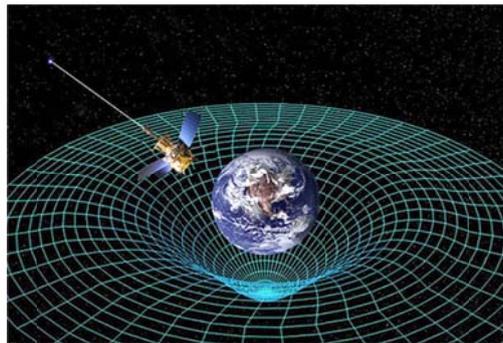
II. Una cima del pensamiento científico: la teoría de la *Relatividad General* de Einstein

Sin embargo, la imaginación popular siempre ha vinculado a Einstein con la relatividad. En 1905 (su *Annus Mirabilis*²) desarrolló la *Relatividad Especial*, que resulta imprescindible cuando intervienen velocidades muy grandes, comparables a la de la luz, para las que la mecánica de Newton ya no es adecuada. Sus consecuencias ($E=mc^2$ aparte) son muy profundas, pues modifica el carácter absoluto y separado del espacio y del tiempo newtonianos; en la relatividad einsteiniana ambos se funden en un único *espaciotiempo* que, por eso, es conveniente escribir sin guión entre espacio y tiempo. Como señaló en 1908 Hermann Minkowski, antiguo profesor de Einstein en el Politécnico de Zúrich, “sólo esa unión retiene una entidad independiente”. Más aún: las *fuerzas*, base de la mecánica de Newton en la que actúan instantáneamente, ‘a distancia’, acabarán cediendo su protagonismo en favor de los *campos* que llenan el espaciotiempo y que pasarán a ser las entidades fundamentales. El nombre de ‘relatividad’, sin embargo, es poco feliz: al revés, la teoría resalta lo que es invariante bajo ciertas condiciones, las *leyes físicas*, que por tanto -y afortunadamente- no son ‘relativas’. Si lo fueran, el progreso de la física sería más difícil y quedaría reducido poco menos que a colecciones de resultados y tablas. José Ortega y Gasset (1883-1955) –quien acompañó a Einstein en su visita a Madrid en 1923- ya había apreciado este importante aspecto de la relatividad como comentó en *El tema de nuestro tiempo* (1923). Incluso el propio Einstein utilizó ocasionalmente *Invariantentheorie* para evitar el nombre de relatividad, pero ya era tarde para cambiar la terminología que él mismo había hecho popular. Pero, denominación aparte, es importante reseñar aquí que Einstein introdujo las consideraciones de simetría como guía en la búsqueda de teorías físicas, principio que ha sido extraordinariamente fértil. En su famoso artículo de la relatividad especial, Einstein deduce primero las transformaciones de Lorentz (que determinan la *relatividad einsteiniana*) y, *después*, estudia la invariancia de las ecuaciones de Maxwell del electromagnetismo bajo ellas. Einstein tuvo, no obstante, un ilustre predecesor: Galileo (1564-1642) ya describió la invariancia de las leyes de la mecánica, en sus famosos *Gedankenexperimente* en la bodega de un barco, bajo las que actualmente se llaman transformaciones de Galileo. Lo hizo en el *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo* (1632), donde intuyó lo que -tras Einstein- se llama hoy *principio de relatividad galileano*, que es el adecuado para la mecánica que pronto establecería Isaac Newton (1643-1727).

La obra cumbre de Einstein es la *Relatividad General* (RG), cuyo centenario se enmarca en las celebraciones del *Año Internacional de la Luz* que acaba de concluir. La RG es una teoría del campo gravitatorio cuyo origen está en la observación de que aceleración y gravedad son localmente equivalentes bajo un cambio de referencia (no

² En ese año maravilloso Einstein publicó también un estudio sobre el movimiento browniano para “encontrar hechos que garanticen lo más posible la existencia de átomos de tamaño definido”. La corpuscularidad de la materia, entonces no universalmente admitida pese a los estudios de los gases de Amadeo Avogadro de 1811 que condujeron a su famoso número, fue comprobada experimentalmente en 1908-09 por J.B. Perrin, (1870-1942, Nobel 1926) quien concluyó que sus resultados “no dejaban duda alguna de la rigurosa exactitud de la fórmula de Einstein”. El ‘tercer’ trabajo de ese prodigioso 1905 fue el que estableció la relatividad *especial* que se mencionará enseguida, al que siguió el artículo que incluía la famosa expresión $E=mc^2$ (Einstein usó en él L para la energía E , de *Lebendige Kraft*, energía ‘viva’).

inercial). La simetría de la relatividad *especial* es *rígida*; la de la relatividad *general* es *local*³. La gravedad es una fuerza de largo alcance, como la electromagnética, aunque muchísimo más débil; los efectos de la gravedad sólo los percibimos gracias a las grandes masas que intervienen en ella. La atracción gravitatoria de dos protones, por ejemplo, es despreciable frente a su repulsión electrostática, que es unas 10^{36} veces mayor que aquélla; en el caso de dos electrones el factor es $\sim 10^{42}$. En muchas ocasiones, la teoría newtoniana resulta suficiente para dar cuenta de la gravedad, pero ya no sirve cuando la gravedad es intensa (o las velocidades muy altas). Eso sucede cuando intervienen objetos de alta densidad, como estrellas de neutrones o agujeros negros, o cuando las escalas son tan grandes que la masa contenida resulta igualmente muy grande.



*Fig.1 Curvatura (geometría) y masa (gravedad)*⁴

La teoría einsteiniana del campo gravitatorio no sólo gobierna el comportamiento del cosmos en su conjunto, sino que ha transformado la cosmología, originalmente una rama de la filosofía o un aspecto más de las religiones, en un área de la ciencia basada en las *ecuaciones del campo gravitatorio* (i.e., de la RG). Einstein las presentó el 25 de noviembre de 1915 en un artículo de cuatro páginas en la *Preussische Akademie der Wissenschaften, Sitzungsberichte*, 1915, 2. Teil, 844–847. Las ecuaciones de la RG son matemáticamente difíciles de resolver, pero conceptualmente son muy sencillas: *geometría = materia-energía*, es decir, la geometría (curvatura) del espaciotiempo está determinada por la distribución de materia y energía (Einstein se refería a los dos miembros de la ecuación, respectivamente, como de ‘marfil’ y de ‘barro’). A mayor masa, mayor deformación; pero la masa no es indispensable, pues la energía produce gravedad y queda afectada por ella. Por eso la luz, que tiene energía pero no masa, también ‘cae’ en presencia de un campo gravitatorio. La famosa expedición de Arthur S. Eddington (1882–1944) comprobó este hecho al observar la desviación de la luz de una estrella por el Sol en el eclipse de 1919, confirmación que catapultó a Einstein a la

³ Los sistemas inerciales de la relatividad especial de Einstein están relacionados por las transformaciones del grupo de Poincaré, que son las mismas para todos los puntos del espaciotiempo y por eso son ‘rígidas’; en el caso de la mecánica de Newton, las correspondientes transformaciones forman el grupo de Galileo, que es el de la relatividad galileana o newtoniana (ambas relatividades, galileana y einsteiniana, son muy distintas: el tiempo, por ejemplo, es absoluto en la mecánica de Newton y no en la de Einstein).

Por el contrario, en la RG son posibles cambios de referencia arbitrarios, diferentes para distintos puntos del espaciotiempo. Al depender del punto considerado, las transformaciones son ‘locales’ (y forman el grupo de difeomorfismos).

⁴ La figura es una visualización algo engañosa: el estiramiento y compresión del espacio producido por un objeto masivo no requiere la existencia de una dimensión adicional, como el dibujo parece indicar.

fama (el eclipse sólo era importante para que la luz del Sol no impidiera hacer las fotos).

La RG predice que la gravedad se propaga a la velocidad de la luz, en contraste con la fuerza de la gravedad newtoniana, que se ‘propaga’ con velocidad infinita y actúa instantáneamente, ‘a distancia’. Vale la pena reproducir las ecuaciones de la RG (las únicas que escribiré), cuya sencillez resulta asombrosa si apreciamos su generalidad, pues dan cuenta de todos los fenómenos gravitatorios:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

“La política es para el momento; una ecuación es para la eternidad” (A. E.)

En el miembro geométrico (el de la izquierda) interviene el tensor de Ricci $R_{\mu\nu}$ y la curvatura escalar R . Uno y otra se expresan en términos de las variables fundamentales de la RG, las componentes del *tensor métrico* $g_{\mu\nu}$; Λ es la famosa constante cosmológica que se mencionará después. En el miembro de la derecha, la materia-energía está descrita por el ‘tensor energía-impulso’ $T_{\mu\nu}$. La RG es, pues, la dinámica del espaciotiempo: como decía el físico teórico John Archibald Wheeler (1911–2008), la materia indica al espaciotiempo cómo debe curvarse, y el espaciotiempo le dice a la materia cómo moverse. Las constantes que aparecen en las ecuaciones nos indican que la RG: 1) es una teoría de la gravitación, pues incluyen G , la constante de la gravitación universal de Newton; 2) es relativista, pues interviene c , la velocidad de la luz y, finalmente, 3) que la RG einsteiniana *no* es una teoría cuántica (es ‘clásica’), pues no incorpora h , la constante de Planck que caracteriza los fenómenos cuánticos (y que éste introdujo en 1900). Einstein estuvo muy satisfecho del logro de la RG, cuyo estudio había iniciado años atrás con el ‘principio de equivalencia de la gravitación y la inercia’ que introdujo en 1907, mucho antes de las ecuaciones de la RG. En una carta del 31-V-1915 en la que se refería a la “espléndida comprobación del desplazamiento de las líneas espectrales por un potencial gravitatorio” (para cuya predicción basta el principio de equivalencia) comentó que, frente a otros avances de la física que “podrían ser realizados por un quídam cualquiera, la relatividad general es de otra clase. Haber alcanzado esa meta me proporciona la mayor satisfacción de mi vida, aunque hasta ahora ni un solo colega se ha dado cuenta de la profundidad y de la necesidad de esta vía”. Muy pronto aparecería uno: tras una visita de Einstein a Göttingen en el verano de 1915, el gran matemático de esa universidad David Hilbert (1862-1943) sí la apreció enseguida e incluso encontró una formulación de las ecuaciones de la RG –salvo matices– que motivó una pequeña discusión con Einstein sobre prioridad. El episodio concluyó con Hilbert reconociendo completamente la de Einstein y la reconciliación de ambos. Hilbert refunfuñaría más tarde: “cualquier chico de las calles de Göttingen sabe más geometría tetradimensional que Einstein. Sin embargo, y pese a todo, fue Einstein quien hizo el trabajo, no los matemáticos”.

La RG, como teoría del campo gravitatorio, es la base de cualquier consideración astronómica y cosmológica. Por ejemplo, la RG da cuenta de la parte *anómala* del movimiento de precesión del perihelio de Mercurio, inexplicable en su totalidad por la mecánica newtoniana como Urbain Le Verrier había puesto de manifiesto a mediados del s.XIX. Según comentó Einstein a su amigo Paul Ehrenfest (1880–1933), lo acertado del cálculo de esa precesión le hizo permanecer “en éxtasis durante varios días”. Pero

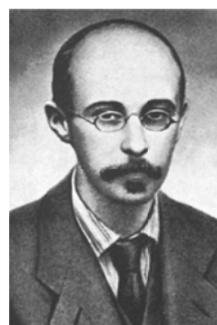
la RG también tiene consecuencias inesperadas: desde filosóficas, pues invalida el apriorismo kantiano sobre la pretendida naturaleza euclídea del espacio (y de paso cuestiona *todo* conocimiento *a priori*), hasta otras bien mundanas: la precisión del GPS (*Global Positioning System*) sería imposible sin las correcciones de la RG que afectan a la sincronización de los relojes de los satélites. De hecho, si todos los aparatos que utilizamos despreocupadamente indicaran el nombre del científico cuyos descubrimientos permiten su funcionamiento, el de Einstein sería omnipresente.

Por supuesto, Einstein no acertó siempre y, a veces, juzgó erróneo lo que no lo era. Pero, como se verá repetidamente, incluso en esas ocasiones su resistencia a aceptar posiciones científicas distintas a la suya señaló siempre un problema fundamental. Su oposición inicial a la expansión del universo le movió a introducir en 1917 la constante cosmológica Λ en el lado geométrico de sus ecuaciones de la RG. Einstein buscaba soluciones de sus ecuaciones de la RG que permitieran describir un universo estático, pues Λ crea una fuerza repulsiva, una especie de anti-gravedad que contrarresta la atracción de la materia ordinaria. Einstein introdujo la constante cosmológica con el ánimo sobrecogido: en una carta (4-II-1917) a Ehrenfest le decía: “he perpetrado algo contra la teoría de la gravedad [la RG] que me pone en riesgo de ser recluido en un manicomio”. El universo estático era entonces la creencia más común hasta que su expansión, predicha por el ruso Alexander Friedmann⁵ (1888-1925) y el abate belga Georges Lemaître (1894-1966), fue observada por Vesto M. Slipher y cuantificada por la famosa ley de Edwin P. Hubble (1889–1953) de 1929. Ésta establece que la velocidad con la que se alejan las galaxias de nosotros es proporcional a la distancia a la que se encuentran, hallazgo que constituye uno de los grandes triunfos de la astronomía óptica. Según parece, Einstein manifestó a George Gamow (1904-68) que la adición de Λ fue “el mayor error de su vida”. Pero el verdadero error de Einstein no fue introducir la constante cosmológica, sino no apreciar que su solución estática no era válida por ser inestable. Sin embargo, la constante cosmológica ha resurgido en el lado no geométrico de las ecuaciones de la RG (el derecho, energía), reinterpretada como proporcional a la densidad de energía del vacío. Vacío físico que, pese a su nombre, no está nada ‘vacío’: en un universo cuántico, el vacío no lo está en absoluto, sino que ‘bulle’ con una infinidad de partículas ‘virtuales’ y, por ende, la densidad de esa energía no disminuye al expandirse el universo pues es una propiedad del propio espacio (ver nota 23). Esa ‘energía oscura’ está distribuida uniformemente y constituye nada menos que alrededor de un 70% del total, interacciona muy débilmente con la materia y es la responsable de la actual *aceleración* de la expansión de universo. Ésta fue observada en 1998 por Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt y Adam G. Riess, quienes compartieron el Nobel de 2011. No se sabe qué es lo que determina la energía oscura⁶

⁵ Cinco años después de que Einstein introdujera la constante cosmológica, el ruso Alexander Friedmann publicó el 29-VI-1922 en el *Zeitschrift für Physik* una solución de las ecuaciones de la RG que correspondía a un universo en expansión. Einstein reaccionó ásperamente el 18-IX-1922 con una nota en la misma revista rechazando el resultado, aunque finalmente reconoció su error ocho meses después (el 31-V-1923), también en el *Zeits. für Phys.*, aceptando que las ecuaciones de la RG permitían un universo en expansión. Hoy cabe considerar a Friedmann como el precursor del *Big Bang*, junto con Lemaître y su ‘átomo primordial’. Lemaître contó que en 1927, durante la famosa conferencia de Solvay de ese año, Einstein le comentó: “sus cálculos son correctos, pero su física es abominable”.

⁶ La *materia normal* (incluyendo a esos efectos radiación y neutrinos) es sólo ~5% del total del universo, así que no es tan ‘normal’; la *materia oscura*, que constituye un ~25%, interacciona muy débilmente con la materia ‘normal’, por lo que no ha sido directamente observada por ahora. Una y otra son las responsables de la atracción de la gravedad a escala galáctica. La materia oscura no emite radiación; de

aunque, como hemos mencionado, tiene las propiedades de una constante cosmológica (conceptualmente recolocada en el segundo miembro de las ecuaciones de la RG). Lo que está claro es que la observación astronómica del movimiento de la materia ordinaria *requiere* la existencia de la materia y energía oscuras. Vistos los desarrollos actuales, procede recordar lo que certeramente expresó Lemaître en un artículo de 1949: “la historia de la ciencia proporciona muchos ejemplos de descubrimientos que han tenido lugar por razones que ya no se consideran apropiadas. Es posible que la constante cosmológica sea uno de esos casos”.



*Con Georges Lemaître en Pasadena, 1932 ;
Alexander Alexandrovich Friedmann*

Tampoco acertó Einstein en su manifiesta hostilidad a los agujeros negros. Resulta sorprendente la oposición de Einstein a su existencia, quizá porque éstos indicaban que su teoría de la RG no era definitiva. El caso es que publicó un trabajo en 1939 en *Annals of Mathematics*, ya en los Estados Unidos, argumentando equivocadamente que no podían existir. Los agujeros negros hicieron ya aparición en el marco newtoniano en la forma de ‘estrellas oscuras’, objetos con una velocidad de escape superior a la de la luz. Pero, al margen de esas premoniciones newtonianas, la historia de los agujeros negros (así bautizados en 1968 por Wheeler) comienza con la

ahí su nombre, aunque sea más ‘transparente’ que ‘oscura’. Su presencia fue postulada en 1933 en el *California Inst. of Technology* por el astrónomo de origen suizo Fritz Zwicky, para explicar que se pudieran mantener unidos los conglomerados de galaxias, concretamente el de Coma. No se sabe de qué está compuesta la materia oscura; entre los candidatos se incluyen los ligeros y por ahora hipotéticos axiones y posibles partículas supersimétricas; en general, WIMPs (*weakly interacting massive particles*). La materia oscura está concentrada en galaxias y conglomerados de galaxias; así pues, la *atracción* gravitatoria de las materias ordinaria y oscura queda limitada a esas zonas ‘reducidas’ que ‘parchean’ el cosmos. Por el contrario, la gravedad *repulsiva* de la *energía oscura*, la energía del vacío, aunque es poco densa y por tanto superada por la atracción gravitatoria a ‘pequeñas’ escalas como la de nuestra galaxia (la Vía Láctea), puede dominar a escalas cósmicas al estar presente por doquier y ser su efecto acumulativo: los ‘trozos’ de vacío se repelen. Esta primacía de la energía oscura no se dio durante la mayor parte de los 13.800 millones de años de vida del universo aunque hay razones para creer que también dominó el universo primitivo, cuando la densidad de energía era extraordinariamente alta, produciendo una expansión velocísima –exponencial– durante un brevísimo lapso de tiempo (el *período inflacionario* que se mencionará luego). Con el paso del tiempo, sin embargo, la densidad de materia ordinaria, de radiación y materia oscura fue decreciendo al expandirse del universo y, desde hace algunos miles de millones de años, la repulsión de la omnipresente energía oscura, de densidad constante, ha pasado a superar la atracción gravitatoria produciendo la actual aceleración de su expansión (fig.8). Como consecuencia, cabe imaginar que en un futuro *muy lejano* nuestra galaxia, unida a Andrómeda y quizá a algunas galaxias enanas próximas, quedará aislada en una soledad realmente cósmica, en la que un posible ser inteligente ya no podría desarrollar una cosmología como la que todavía es posible hacer hoy.

anticipación de Karl Schwarzschild (1873-1916), quien encontró enseguida (en 1915) la primera solución exacta de las ecuaciones de la RG y, especialmente, con el estudio del colapso estelar en 1939 por Robert Oppenheimer (1904–67, el futuro director científico del proyecto Manhattan) y Hartland Snyder. Hoy, los agujeros negros no lo son tanto por la radiación que describió Stephen Hawking (1942-). Éste encontró al considerar efectos cuánticos (los agujeros negros *clásicos* de la RG no radian) que emiten radiación con el espectro de un cuerpo negro⁷. Un agujero negro muy pequeño podría ser hasta blanco debido a esa radiación; su temperatura es inversamente proporcional a la masa por lo que para agujero negro de unas pocas masas solares sería ridícula, de unos 10^{-7} grados Kelvin. Hoy hay evidencia de numerosos agujeros negros, por ejemplo resultado de la explosión de supernovas; la mayoría de las galaxias contienen uno en su centro, con masas de millones de la del Sol. Hay uno supermasivo en el centro de nuestra Vía Láctea, Sagittarius A* (Sgr A*), con una masa de unos cuatro millones de soles. Y la *primera* observación ‘directa’ de dos agujeros negros de masa estelar del mayor tamaño encontrado hasta ahora, formando además un sistema *binario* que acaba fusionándose en uno solo, jugará enseguida un papel esencial en esta narración.

III. Ondas gravitatorias y su detección por LIGO

Incitado -según parece- por Schwarzschild, Einstein observó en sendos artículos en la Academia Prusiana de 1916 y 1918 que, en primera aproximación, las ecuaciones de la RG daban lugar a ondas gravitatorias (el trabajo de 1918 corregía un error del anterior), ondulaciones del propio espaciotiempo. Era natural preguntarse por la existencia de estas ondas (que *no* son posibles en la gravedad newtoniana), pues las ecuaciones de Maxwell predicen la existencia de ondas electromagnéticas. Éstas se denominaron en su día ‘ondas hertzianas’ en honor de Heinrich Hertz⁸ (1857-1942), quien las detectó en Karlsruhe en 1885-89. Sin embargo, Einstein cuestionó después la



*Erwin Rudolf Josef Alexander Schrödinger (1887-1961, Nobel 1933)
y Max Born (1882-1970, Nobel 1954)*

⁷ Se llama radiación del *cuerpo negro* a la que emiten esos cuerpos, que se caracterizan por absorber la radiación completamente, de ahí su nombre. Al calentarse, los cuerpos negros emiten una radiación característica cuyo espectro depende exclusivamente de su temperatura (por eso se habla de temperatura de esa radiación), y la intensidad de su superficie.

⁸ Hertz también descubrió en 1887 el efecto fotoeléctrico en uno de esos curiosos giros de la historia de la ciencia: las ‘ondas hertzianas’ probaban el carácter ondulatorio de la luz, y el efecto fotoeléctrico sería el primer paso hacia la manifestación de su corpuscularidad (ver nota 22).

existencia de ondas gravitatorias. Dada la importancia de éstas, vale la pena recordar este curioso episodio y, puesto que hace sólo una semana se ha anunciado la primera observación directa de esas ondas a su paso por la Tierra, daremos también cuenta de este extraordinario descubrimiento con alguna extensión. Pero empecemos por el inicial rechazo de Einstein. En una carta de 1936 a Max Born (Nobel en 1954 “por sus investigaciones fundamentales sobre la mecánica cuántica, especialmente por su interpretación estadística de la función de onda”), Einstein comentaba: “junto con un joven colaborador [Nathan Rosen, su asistente en Princeton] he concluido que las ondas gravitatorias no existen, aunque se daban por seguras en primera aproximación. Esto muestra que las ecuaciones de campo *no lineales* [mis cursivas] de la relatividad general... nos limitan más de lo que habíamos creído hasta ahora”.

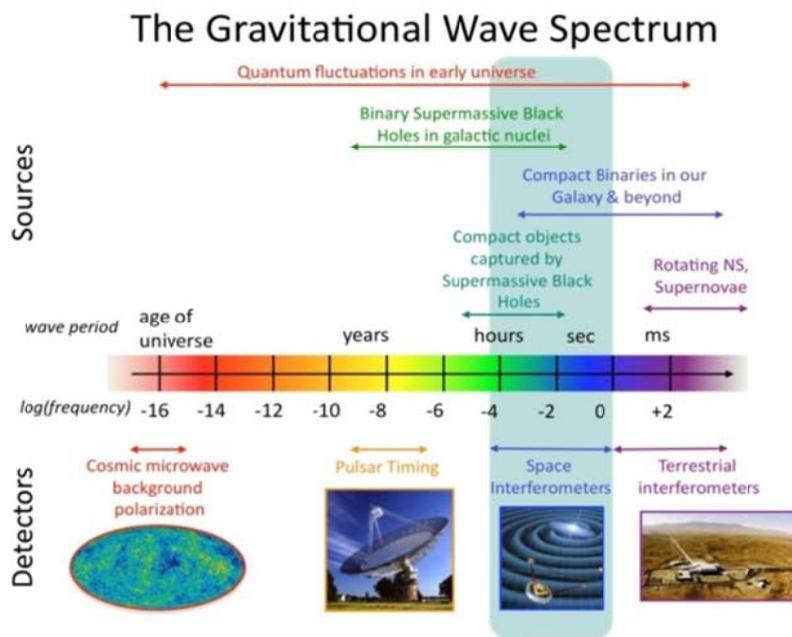


Fig.2 El espectro de ondas gravitatorias (NASA Goddard Space Flight Center)

El trabajo de Einstein y Rosen *¿Existen las ondas gravitatorias?* fue enviado a *The Physical Review*, la revista de física más importante. Cabe suponer que el artículo detallaría las razones de la oposición a su existencia que Einstein había mencionado a Born. Einstein, con todo su prestigio a sus espaldas, no esperaba que el artículo se remitiera a un *referee* antes de publicarse. Pero así fue; su trabajo fue tratado como cualquier otro y dos meses después recibió el correspondiente informe junto con una carta del editor del *Physical Review* en la que le solicitaba que “considerara los distintos comentarios y críticas que el *referee* del trabajo había efectuado”. Einstein, airado y ofendido, retiró el artículo: “[el Sr. Rosen y yo] le enviamos el manuscrito para que se publicara y no le habíamos autorizado a que lo remitiera a ningún experto... No veo ninguna razón para discutir los comentarios –en cualquier caso erróneos- de su anónimo especialista. Como consecuencia de este incidente prefiero publicar el trabajo en otra revista”. El editor respondió lamentándolo, pero insistiendo en que no podía “aceptar un artículo en el *Physical Review* cuyo autor no permitiera mostrarlo al consejo editorial antes de publicarlo”. Sin embargo, Einstein y Rosen debieron reconsiderar después sus conclusiones: cuando su trabajo apareció publicado en 1937

(en el *Journal of the Franklin Institute*) habían corregido un serio error aprovechando las galeradas (una sutileza del sistema de coordenadas para la que hoy se llama 'métrica de Einstein-Rosen') y le habían dado un nuevo título, *Sobre las ondas gravitatorias* (el mismo que tenía el artículo de 1918), estudiando las ondas gravitatorias cilíndricas. Cabe preguntarse por la identidad del concienzudo *referee* que corrigió a Einstein. *The Physical Review* desclasificó hace años el libro de registros de esa época, ya fallecidos todos los protagonistas, y todo indica que fue el gran relativista Howard P. Robertson (1903-61). Einstein, pese a no tener razón en el 'incidente' que le evitó publicar una afirmación errónea, se mantuvo en sus trece y no volvió a someter ningún artículo más al *Physical Review* (el último suyo en esa revista había sido el famoso trabajo 'EPR' de 1935, sobre el que volveremos).

Pero no hay nada como la verificación experimental. Aunque hubo que esperar más de medio siglo y Einstein no llegó a verlo, la emisión de ondas gravitatorias fue observada *indirectamente* estudiando el púlsar binario PSR B1913+16, descubierto por Russell A. Hulse y Joseph H. Taylor Jr. en 1974 con el gran radiotelescopio de 300 m de

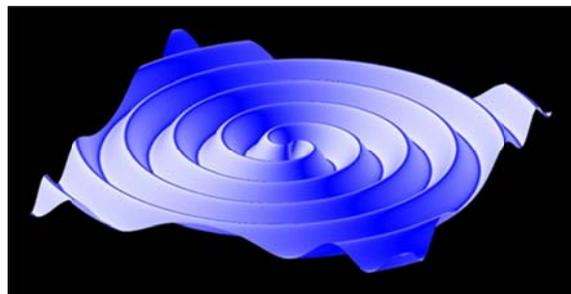


Fig.3 Ondas gravitatorias

diámetro de Arecibo (Puerto Rico), lo que les valió el Nobel de 1993. Un púlsar es una estrella de neutrones que gira sobre sí misma cientos de veces por segundo, producto de la explosión de una estrella como una supernova. Es un objeto densísimo (una cucharilla de púlsar pesaría 100 millones de toneladas; sólo los agujeros negros son más densos), que emite un haz de partículas y radiación por sus polos magnéticos produciendo el efecto de un faro cuando 'ilumina' periódicamente a un observador. El púlsar y la estrella de neutrones del sistema PSR B1913+16, de un radio de pocos kilómetros y masa comparable a la del sol, giran con creciente velocidad uno en torno a otro en una órbita de unas cuantas órbitas lunares, cada vez menor; la pérdida de energía se corresponde exactamente, con una precisión de 2 partes en mil, con la emitida en forma de ondas gravitatorias. Éstas se producen porque, de la misma forma que una carga acelerada emite ondas electromagnéticas, una masa acelerada emite ondas gravitatorias. Por ello, el sistema binario pierde energía y el radio de la órbita va disminuyendo en una espiral recorrida hacia el centro, una 'inspiral'. Hasta nosotros mismos emitimos ondas gravitatorias –absolutamente imperceptibles, por supuesto– cuando movemos los brazos. Pero no hay simetría en cuanto a la intensidad del electromagnetismo y la gravedad: como se ha dicho, el primero es muchísimo más fuerte. Por eso es fácil producir ondas electromagnéticas detectables, como comprobamos cada vez que oímos la radio o nos llega un SMS y, sin embargo, la observación de ondas gravitatorias requiere emisores excepcionalmente potentes y receptores increíblemente sensibles.

Pero el 11-feb-2016, un siglo después de los artículos de Einstein (y hace una semana cuando escribo estas líneas), se ha hecho pública la detección *directa* de ondas gravitatorias; el hecho es tan trascendental para la física que merece que nos detengamos en él. Éstas proceden de un sistema binario, esta vez ¡de agujeros negros!, de nuevo en un movimiento ‘inspiral’ debido a la pérdida de energía por la emisión de ondas gravitatorias de frecuencia creciente, de unos 35 Hz a 250 Hz. La aproximación fue gradual durante miles de millones de años y velocísima en los últimos minutos, para acabar en la última fracción de segundo a 75 vueltas/s, en órbitas de pocos centenares kilómetros, hasta colisionar ¡a más de la mitad de la velocidad de la luz! (0.6c) y fundirse en un solo agujero negro (giratorio, ‘de Kerr’). Este auténtico cataclismo cósmico, el acontecimiento de 0.2 segundos de duración ‘GW150914’ (= *Gravitational Waves 14-sep-15*, fue detectado el 14-IX-2015 primero por el observatorio LIGO-Livingston (Louisiana) y, 7 milisegundos después, por su homólogo LIGO-Hanford (Washington) a 3000 km de distancia, con completo acuerdo entre las mediciones de uno y otro (fig.4). Teniendo en cuenta que según la RG las ondas gravitatorias viajan a la velocidad de la luz, la diferencia temporal ha permitido mediante una triangulación establecer que la fuente de GW150914 estaba en la bóveda celeste del hemisferio Sur, a unos 1.34×10^9 años luz, vagamente en la dirección de la gran nube de Magallanes. Más aún, la señal observada coincide con la calculada numéricamente a partir de las ecuaciones de la RG de Einstein: *todo* en GW150914 concuerda con la RG. Einstein, aunque sorprendido, hubiera entrado de nuevo en éxtasis, esta vez más prolongado: como dijo en el anuncio de la gran noticia France A. Córdova, directora de la *National Science Foundation* (NSF), “Einstein estaría radiante”.

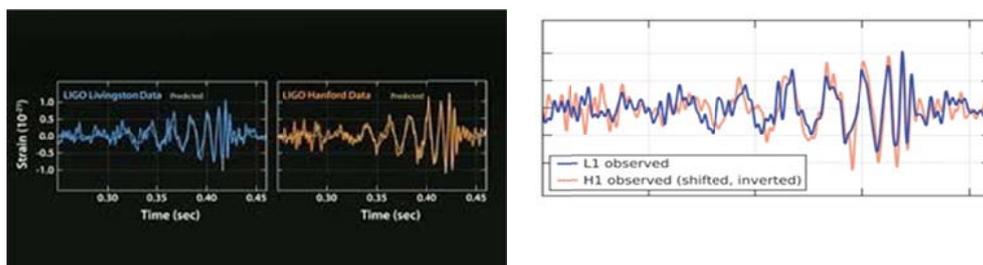


Fig.4 Las observaciones en Livingston y Hanford y su coincidencia

La sigla LIGO corresponde a *Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory*. La avanzadísima y exquisita tecnología de los dos interferómetros (tipo Michelson modificado), cada uno con brazos perpendiculares de ¡cuatro kilómetros! (foto), permite que detecten el paso de las ondas gravitatorias ya que la tracción y compresión que éstas producen deforman los dos brazos de forma levísima, pero desigual. Los interferómetros pueden llegar a ser sensibles a variaciones de longitud increíblemente pequeñas, hasta $1/10.000$ del diámetro de un protón, que es del orden de 10^{-15} m. La fusión de los dos agujeros negros, de masas en torno a 35 y 29 veces la del Sol en números redondos, dio lugar a un único agujero negro de unas 62 masas solares. Éste, inicialmente deformado, acabó oscilando como una campana golpeada por un martillo, emitiendo más ondas gravitatorias en un ‘ringdown’ final que atenuó las vibraciones de su superficie (horizonte), ‘desexcitándolo’ casi instantáneamente hasta la estabilidad (el ‘silencio’, fig.5). Así pues, la fusión representó la súbita liberación en una fracción de segundo de una enorme energía en forma de ondas

gravitatorias igual a unas 3 veces la masa del Sol⁹ ($E=mc^2$), con un pico de potencia de esas ondas radiadas por GW150914 de junas 50 veces la de la luz de todo el universo visible! El paso de las distorsiones espaciotemporales originadas por las ondas gravitatorias creadas por el completo colapso de ese sistema binario, gigantesca y espectacular tormenta del (*del*, no 'en el') espaciotiempo (fig.5), es lo que se ha observado 1300 millones de años después pese a la extrema debilidad de esas ondas al alcanzar la Tierra (también las olas de una gran tormenta lejana pueden ser casi imperceptibles al llegar a la playa).

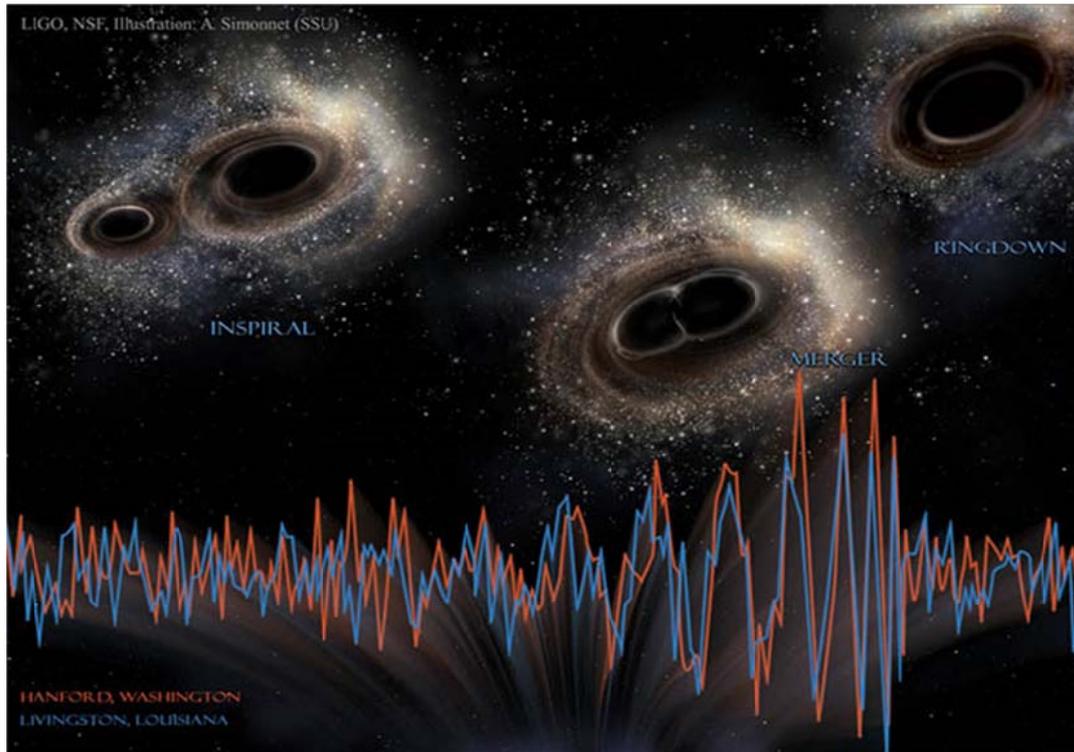


Fig.5 Cálculo numérico de la colisión y fusión de dos agujeros negros: 'inspiral', fusión, y 'ringdown' (= 'desexcitación' y estabilización del agujero negro final). Figuras: SXS (Simulating eXtreme Spacetimes Project)

El acontecimiento GW150914 observado por LIGO es de excepcional importancia para la física, pues incluye *tres* descubrimientos espectaculares: la primera detección directa de ondas gravitatorias y en el régimen fuerte de las ecuaciones de la RG, no en la aproximación del campo gravitatorio débil; la primera observación de la existencia agujeros negros de esas masas, además en un sistema binario y, finalmente, su fusión en uno solo. Recordemos que el análisis del movimiento espiral convergente del púlsar binario PSR B1913+16 sólo había permitido concluir que se emitían ondas gravitatorias *indirectamente*, aunque con gran precisión, y que hasta ahora no se habían observado directamente agujeros negros, ni en parejas, ni mucho menos su fusión. No es extraño que David H. Reitze, director ejecutivo de la colaboración LIGO que involucra a Estados Unidos, 14 países más y a un millar de personas (seis de ellas, coautoras del *Physical*

⁹ Las resultados de las simulaciones numéricas son compatibles con el teorema del área de Hawking, pionero de la 'termodinámica' de los agujeros negros. Éste establece que la suma de las superficies de los 'horizontes' de los dos agujeros negros iniciales ha de ser menor que la del agujero negro que resulta de su fusión (el área se comporta como una entropía y, por tanto, no puede decrecer), lo que pone una cota superior a la energía total radiada en forma de ondas gravitatorias.

Review Letters que anunció el descubrimiento, de la Univ. de las Islas Baleares: Alicia M. Sintes y Sascha Husa, ambos miembros de la RSEF, y J. Calderón, F. Jiménez, D. Keitel y M. Oliver), iniciara la rueda de prensa¹⁰ de la NSF recreándose en sus palabras: *We have detected gravitational waves. We did it!*



Advanced LIGO Hanford y Advanced LIGO Livingston

Es bien posible que hayan hecho más: entre los datos de LIGO que quedan por estudiar es muy probable –es un secreto a voces- que alguna otra detección esté ya siendo analizada. Y en breve habrá LIGOs formando una red global (con Italia, India, Japón, GEO600 en Alemania) que permitirá una mejor detección (y localización de la fuente gracias a una mejor triangulación). Incluso cabría estudiar un posible fondo de ondas gravitatorias.

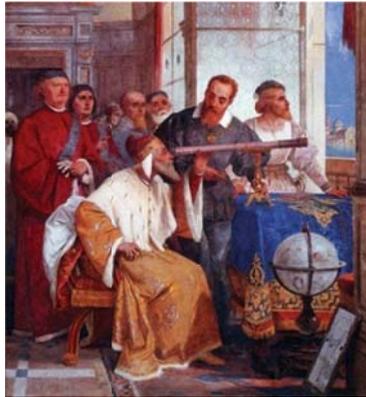


Alicia M. Sintes en el observatorio LIGO de Livingston

Desde el s. XVII con Galileo, la astronomía progresó viendo –literalmente- planetas y estrellas utilizando telescopios ópticos ordinarios, refractores o reflectores (*astronomía óptica*). Hoy, el mayor observatorio óptico del mundo se encuentra en Cerro Paranal, en el desierto de Atacama en Chile: el *Very Large Telescope* [VLT] del *European Southern Observatory* tiene cuatro grandes reflectores principales móviles de 8.2 m. de diámetro. Durante el pasado siglo, la capacidad de observación se aceleró gracias a la utilización de radiotelescopios (*radioastronomía*), a situar instrumentos en el espacio (*astronomía de rayos X*), o incluso gracias a la astronomía de rayos gamma,

¹⁰ En la que, por supuesto, no olvidó expresar su sincero agradecimiento a los *tax-payers*. El proyecto LIGO, iniciado en 1994, ha sido financiado por la NSF y concebido y realizado por el MIT y Caltech. La detección se produjo muy pronto, en las pruebas preliminares; era tan clara que hubo que descartar que fuera una ‘trampa’, una señal falsa de las que se introducen adrede y secretamente para mantener alerta a los investigadores.

la radiación electromagnética de mayor energía (o frecuencia; ver fig.6). No obstante, todas estas distintas ‘astronomías’ tienen una característica común: todas observan radiación electromagnética. Sólo una pequeña parte de ese espectro –la que abarca el arco iris- es visible para nuestros ojos, pues somos ciegos más allá del violeta (‘ultravioleta’) y por debajo del rojo (‘infrarrojo’), aunque ninguna característica especial separa el resto del espectro electromagnético de la zona visible; la astronomía óptica cubre esa zona (o algo más). Del mismo modo, la radiación cósmica de fondo en la zona de microondas que llena el universo, la *Cosmic Microwave Background* (CMB), una de las bases del *Big Bang* o *modelo cosmológico estándar* del origen del universo, es también radiación electromagnética y es detectada por radiotelescopios. Así la



Galileo mostrando su telescopio al Dogo de Venecia

encontraron –accidentalmente- Arno Penzias y Robert W. Wilson en 1965 cuando calibraban la *horn antenna* (por su forma de cuerno) de los *Bell Labs*. en Holmdel (New Jersey), recibiendo el premio Nobel de 1978 “por su descubrimiento de la CMB”. La existencia de la CMB ya había sido predicha por Ralph A. Alpher (que fue doctorando de Gamow) y Robert C. Herman en 1948, aunque su trabajo permaneció ignorado.

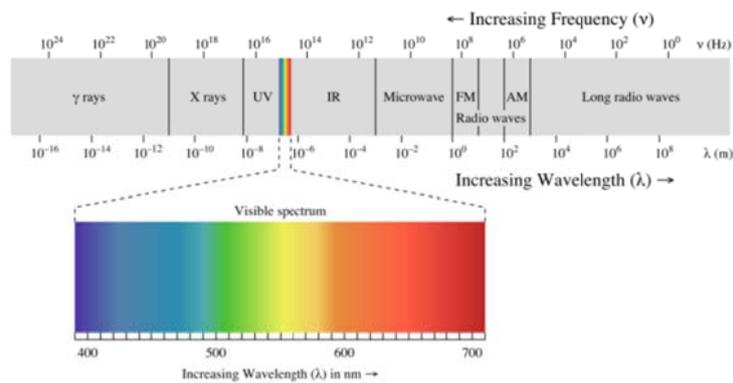


Fig.6 El espectro electromagnético
(la longitud de onda λ y la frecuencia ν son inversamente proporcionales)

La CMB inició su viaje cuando el universo se hizo transparente para la luz, unos 380.000 años tras el *Big Bang*; se trata, por tanto, de la ‘luz’ más antigua del universo. Antes, éste estaba formado por un plasma densísimo y muy caliente de fotones, protones y electrones, opaco para la radiación electromagnética. Sólo tras su parcial enfriamiento durante esos primeros 380.000 años los electrones y protones pudieron unirse para formar un gas de átomos neutros, *desacoplándose* la radiación y dando

lugar a un universo transparente en el que la luz ya pudo viajar libremente. Esta radiación de fondo, cuyo espectro coincide con extraordinaria exactitud con la curva de la radiación térmica que cabría esperar de un caliente universo primitivo, es la que hoy nos llega correspondiendo casi uniformemente¹¹ a la temperatura absoluta de 2.7K (grados Kelvin, $\sim -270^{\circ}\text{C}$), la misma en todas las direcciones. Sin embargo, la información sobre el universo anterior a esos primeros 380.000 años, el universo primitivo o *primordial*, es muy difícil de obtener. No obstante, se ha tratado de hallar

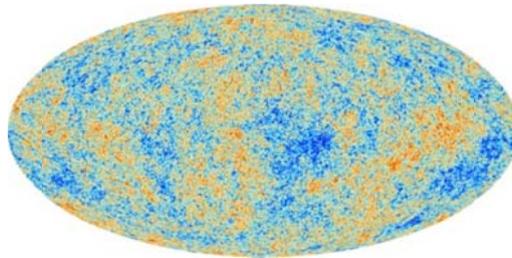


Fig.7 La luz más antigua del universo: la CMB y sus leves anisotropías
(satélite Planck de la Agencia Espacial Europea, 2013)

La figura se obtiene cortando la esfera celeste por un 'meridiano' y abriéndola por ambos lados

el rastro de las ondas gravitatorias primordiales que prevé la teoría de la *inflación* (nota 13) buscando su huella en la CMB (los 'modos B' de polarización). El observatorio BICEP2 (*Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization 2*) en el polo Sur, pareció detectar en 2014 la 'señal' dejada por esas ondas primordiales en la radiación de fondo y por tanto su existencia, aunque ésta habría sido una detección menos directa que la observada por LIGO. Sin embargo, un posterior análisis conjunto de los datos de BICEP2/KEK *array* y del satélite europeo Planck (que ha producido hasta ahora el mapa más detallado de la CMB, fig.7), mostró que dichos efectos eran consecuencia de contaminación debida al polvo cósmico en nuestra galaxia indicando, de paso, la dificultad de observar ondas gravitatorias por esa vía. LIGO, por su parte, probablemente no sería capaz de detectar esas ondas primordiales. Paralelamente a estos esfuerzos, la Agencia Europea del Espacio (ESA) lanzó el 3-XII-15 el satélite *LISA (Laser Interferometer Space Antenna) Pathfinder*. Éste ya ha llegado al 'punto de Lagrange 1', un lugar de estabilidad a millón y medio de kilómetros de la Tierra y en dirección al Sol, donde pondrá a prueba los instrumentos para un futuro observatorio espacial de ondas gravitatorias. Éste tendrá tres satélites en los vértices de un gigantesco triángulo, con lados de un millón de km, para detectar las vibraciones del espaciotiempo. También otras grandes instalaciones, como el *IceCube*, el mayor detector de neutrinos del mundo (el *South Pole Neutrino Observatory* es un cubo de

¹¹ Las pequeñas (de 1 parte en 10^5) fluctuaciones de temperatura, huella de la expansión súbita tras el *Big Bang*, corresponden a regiones de densidades levemente diferentes y son las semillas de las futuras estructuras, las estrellas y galaxias de hoy. Estas pequeñas variaciones, reflejo de las fluctuaciones cuánticas del universo primitivo, apoyan la idea de la *inflación*. Ésta da cuenta de la *hinchazón* súbita que sufrió el universo en sus orígenes: describe su evolución inmediatamente después del *Bang* del *Big Bang* (ver nota 13), pero no el propio *Bang*, del que no dice absolutamente nada. Durante el brevísimo período inflacionario (hasta $\sim 10^{-35}$ s tras el *Big Bang*) un universo increíblemente diminuto (más pequeño que un protón) se expandió exponencialmente, al menos $\sim 10^{30}$ veces. Cabe imaginar que el universo 'inicial' era tan pequeño que ya tenía una temperatura uniforme y la inflación preservó esa propiedad. La expansión de las ondas de la radiación liberada 380.000 años después ha reducido su temperatura a los actuales 2.7K de la CMB. Ésta presenta, además, la pequeñísima falta de uniformidad ya mencionada que prevé la inflación.

1km de lado) y ANTARES (éste en el fondo del Mediterráneo, a 40 kms de Tolón en Francia), han tratado de observar neutrinos de alta energía atribuibles a GW150914. Su detección permitiría fijar mejor la situación del violentísimo acontecimiento, pero un artículo muy reciente de la colaboración ANTARES-IceCube-LIGO-Virgo informa de que no se han observado neutrinos que puedan ser asociados a GW150914. De hecho, el resultado se ha utilizado para establecer cotas para la emisión de neutrinos en ese tipo de sucesos que, aunque posible, no parece probable (fotones y neutrinos serían abundantes si la fusión fuera, por ejemplo, de un agujero negro con una estrella de neutrones).



El radiotelescopio BICEP2 y la instalación exterior del detector de neutrinos IceCube cerca del Polo Sur

Es conveniente insistir en que las ondas gravitatorias tienen una naturaleza completamente distinta a la radiación electromagnética; genéricamente, cabe referirse a esta última como 'luz', sea visible o no. Por el contrario, la radiación gravitatoria no es consecuencia de las ecuaciones de Maxwell del electromagnetismo, sino de las ecuaciones del campo gravitatorio de la RG de Einstein: no corresponde a ondas propagándose *por* el espacio como las electromagnéticas, sino que son perturbaciones *del propio* espaciotiempo. Se trata de ondas producidas por el movimiento de masas aceleradas que no pueden ser apantalladas, absorbidas ni desviadas. Por ello, aunque no se puede ver la luz de regiones enteras de la Vía Láctea debido al polvo que encuentra en el camino y tampoco se puede observar directamente la primera parte del *Big Bang* porque el Universo era opaco hasta que cumplió 380.000 años, la situación para las ondas gravitatorias es completamente distinta. Como prácticamente no interactúan, pueden propagarse a la velocidad de la luz a distancias cosmológicas sin corromperse -sin distorsión- y la información que transportan sigue siendo la misma que cuando se crearon en un tiempo muy lejano. Además, como un instante después del *Big Bang* el universo ya era 'transparente' para las ondas gravitatorias, éstas han abierto una ventana a una astronomía completamente nueva que permitirá observar el universo en sus comienzos, sin las limitaciones de la astronomía electromagnética. Kip Thorne, uno de los promotores de LIGO en la década de los 80 (junto con R. Weiss, R. Drever y otros), gran experto en el campo y coautor de un libro clásico sobre gravitación –el 'de la manzana'- dijo en una ocasión que "la gravitación es el paraíso de los teóricos y el infierno de los experimentales". Hace meses se cruzó la puerta de ese infierno experimental pero, al contrario que en el infierno de Dante, hacia la esperanza de una nueva forma de observación. Se ha abierto un nuevo campo de investigación, la *astronomía de ondas gravitatorias*, que dará acceso a los aspectos literalmente más retorcidos del universo, antes inaccesibles, y que permitirá también explorar sus inicios (el *Bang* del *Big Bang*), donde los aspectos cuánticos de la gravedad no pueden ignorarse.

En efecto, al analizar el universo primitivo se podrá ir más allá de la teoría de la RG de Einstein que, al no ser cuántica, ha de aceptarse como una aproximación de una teoría más completa cuya formulación no coincidirá con las ecuaciones de la RG¹². Pero aún no se conoce la teoría cuántica de la gravedad, el Santo Cáliz de la física teórica. El origen de la dificultad de esa cuantización es fácil de comprender: en las demás teorías, se cuantizan campos (el de Dirac o el electromagnético, por ejemplo) que están definidos *sobre* el espaciotiempo; en la gravedad, se intenta cuantizar la geometría espaciotemporal misma. Como teoría cuántica de campos, se dice que la gravedad no es *renormalizable*, lo que expresa que no se pueden eliminar consistentemente los infinitos sin sentido (las divergencias ‘ultravioleta’) que inevitablemente genera la teoría, algo que ya sospechaba Richard P. Feynman (1918-88, Nobel 1965) en sus lecturas sobre gravedad de Caltech, impartidas en el curso 1962-63. Una posibilidad de evitar divergencias es introducir *más simetría*; la *supergravedad* y la teoría de cuerdas están en esa línea, que no está exenta de otros problemas.

La actual ausencia de una teoría cuántica de la gravedad hace difícil, en particular, dar cuenta de los inicios del universo, hoy descritos por medio de la *inflación*¹³. Volviendo

¹² Por ejemplo, se pueden estudiar los cambios en las ecuaciones de la RG einsteiniana que se obtienen cuando se modifica la ‘acción’ de Hilbert-Einstein que conduce a ellas (el *principio de acción* suele usarse para establecer las ecuaciones de las teorías fundamentales y la RG no es una excepción). La acción de la RG viene dada en términos de la curvatura escalar R ; la modificación más sencilla es el modelo de A. Starobinsky (1980) que se obtiene añadiendo un término en R^2 . El resultado es equivalente a la RG con la adición de un campo escalar (el *escalón* en la terminología original). El modelo de Starobinsky es un modelo inflacionario (nota siguiente) y está de acuerdo con los datos del satélite Planck (fig.7) para la CMB. Otros modelos se obtienen utilizando distintas potencias de tensores \mathcal{R} relacionados con la curvatura (son, por tanto, ‘*higher curvature theories*’); el modelo de Starobinsky también se puede englobar en teorías de supergravedad, etc.

¹³ La(s) teoría(s) de la inflación fueron iniciada(s) a principios de los años ochenta por A. Starobinsky (*avant la lettre*), A. Guth (quien acuñó el término *inflación* en 1981), A. Linde, P. Steinhardt (y otros). La inflación es un brevísimo período de expansión acelerada en el origen del universo. La teoría del *universo inflacionario* permite explicar algunas de sus sorprendentes propiedades, de las que aquí mencionaremos dos. La primera es que, muy aproximadamente, el *universo* actual es *crítico* o geoméricamente plano. Esto corresponde a que una cierta constante Ω , que recibe contribuciones tanto de la materia ordinaria y la radiación ($\Omega_m \sim 0.05$), como de la materia oscura (*cold dark matter*, $\Omega_{\text{CDM}} \sim 0.25$) y de la energía oscura ($\Omega_\Lambda \sim 0.7$), vale la unidad: $\Omega \sim 1$. Como $\Omega = 1$ es un punto de equilibrio inestable para una expansión decelerada, para que hoy sea $\Omega = \Omega_m + \Omega_{\text{CDM}} + \Omega_\Lambda \sim 1$ –incluso permitiendo un generoso margen– en los inicios del universo debería ser exactamente $\Omega = 1$ con una precisión tan gigantesca como absurda (lo que constituye el problema del ajuste fino o *fine tuning*); un *Bang* cualquiera no explicaría por qué $\Omega \sim 1$ hoy. Pero el *Bang inflacionario*, sin embargo, consigue que Ω acabe siendo uno aunque inicialmente no lo fuera, de la misma forma que una parte de la superficie de una esfera se parece cada vez más a un plano cuanto más se hincha ésta; de hecho, para la expansión acelerada, $\Omega = 1$ es lo que se llama un ‘atractor’.

Otra característica del universo que requiere explicación es que es homogéneo e isótropo a gran escala (*principio cosmológico*), pese a estar repleto de regiones causalmente desconectadas *i.e.*, que no podrían ‘ponerse de acuerdo’ por medio de señales luminosas. Éste es el *problema del horizonte* pues, ¿cómo podrían ‘ajustar’ sus propiedades dos horizontes (límites observables) opuestos del universo, separados por 13.800 millones de años luz en ambas direcciones, para conseguir parecerse? (se habla de *superhorizonte* cuando hay desconexión causal, y de *subhorizonte* en caso contrario). El modelo inflacionario del universo resuelve el problema porque las regiones que hoy están causalmente desconectadas formaron parte inicialmente de una diminuta región del *Bang* inflacionario no muchísimo mayor que la longitud de Planck (1.6×10^{-35} m).

La mecánica cuántica y más precisamente la teoría cuántica de campos en un universo en expansión (iniciada por Leonard Parker en los 1960) es responsable de las fluctuaciones que, junto con la hipótesis

a la radiación gravitatoria, es importante conocer si el cuanto asociado, el *gravitón*, tiene exactamente masa cero (y *helicidad* dos) al igual que el *fotón* (éste de *helicidad* uno), que es el cuanto de la radiación electromagnética. La masa cero corresponde a propagación con la velocidad de la luz c ; si el gravitón tuviera masa m_g no nula, tendría más ‘polarizaciones’ y la fuerza gravitatoria disminuiría más rápidamente con la distancia, lo que tendría consecuencias a la hora de atribuir la expansión acelerada del universo a la energía oscura. Los resultados de LIGO establecen una cota superior insignificante, $m_g < 1.2 \times 10^{-22} \text{ eV}/c^2$ (otras cotas son aún menores), así que es casi seguro que el gravitón tiene masa cero.

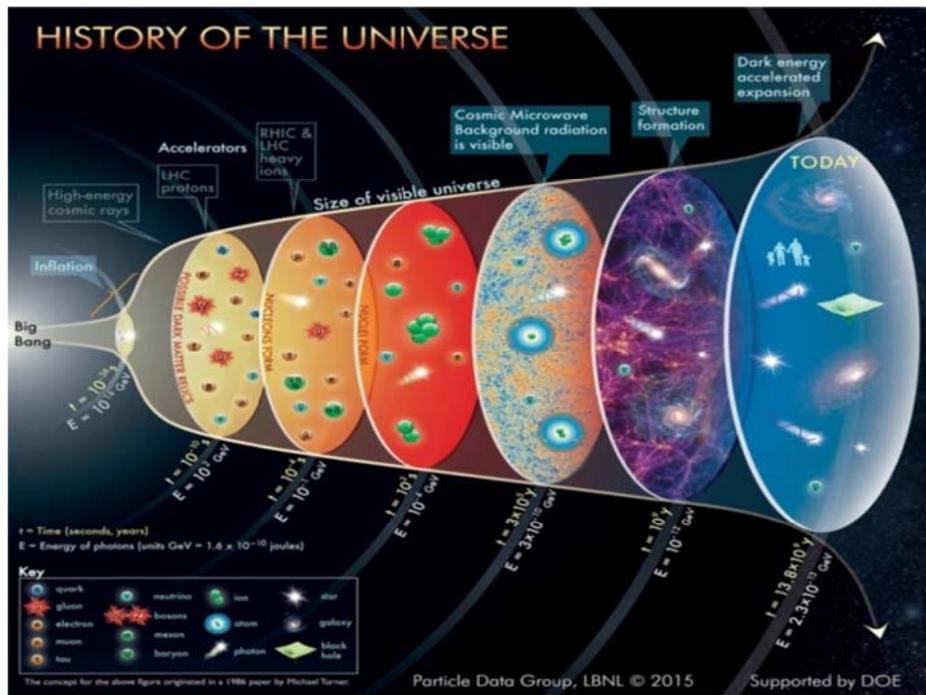


Fig.8 La historia del Universo (Particle Data Group, LBNL 2015)

inflacionaria, permiten explicar las estructuras actuales del universo. Pensando en la nucleosíntesis, Carl Sagan decía que somos materia de estrellas (*star stuff*), pero igualmente podríamos decir yendo más atrás en el tiempo que somos resultado de ‘fluctuaciones cuánticas’, tanto nosotros como las estructuras del universo: planetas, estrellas, galaxias... Como se ha mencionado, esas fluctuaciones también dejaron su huella en la CMB y su observación es una prueba en favor de la inflación. Por supuesto, una cuestión importante es el estudio del mecanismo cuántico que la desencadena; éste requiere la presencia de un campo escalar (como el bosón de Higgs descubierto en 2012 en el LHC del CERN), genérica y apropiadamente llamado *inflatón*, que sería el responsable de la enorme densidad del universo inicial.

La inflación plantea, además, una cuestión muy interesante: ¿se necesita energía para iniciar el *Bang* inflacionario? La energía del campo gravitatorio newtoniano es *negativa*, lo que sigue siendo cierto en la RG. La masa tiene por supuesto energía positiva; si se tiene en cuenta la negativa del campo gravitatorio, se puede mantener el principio de conservación de la energía, que no pone límites al crecimiento inflacionario de una y otra con tal que su suma, la energía total, sea constante e incluso cero. El brillantísimo Feynman ya había considerado, en las lecturas de Caltech citadas de 1962-63, que la energía total del universo bien podía ser cero y que la creación de materia era posible porque su energía podía cancelarse por la energía potencial gravitatoria. En ese caso, el universo aparecería de la nada, o casi, para hincharse después. Como dijo Alan Guth, “*the universe is the ultimate free lunch*”. La física cuántica y la inflación, juntas, permitirían que el universo haya surgido de la nada, *gratis*, una idea cuyos antecedentes se remontan a Richard C. Tolman (1932) y que expuso (para un universo oscilante) en su clásico texto *Relativity, Thermodynamics, and Cosmology* (1934); la idea de que el universo es una fluctuación cuántica fue considerada por Edward P. Tryon en un artículo de dos páginas (*Nature*, 1973).

IV. La mecánica cuántica y el *realismo local* de Einstein

Tras los capítulos II y III dedicados a la RG, justificados por la importancia de las noticias de esta última semana en las que las ondas gravitatorias y la RG han acaparado la atención, regresemos a nuestro protagonista. Como es natural, Einstein no fue ajeno a su tiempo. La física de las partículas elementales, esencial en muchos avances, no se había desarrollado todavía; por ello, sus afanes unificadores se dirigieron a la gravedad y el electromagnetismo, las dos grandes teorías de la física de la época. Al tratarse de dos teorías clásicas, Einstein podía dejar de lado la MC dada su manifiesta disconformidad con sus fundamentos pero, probablemente por evitarla, no tuvo éxito en ese empeño unificador, al que dedicó mucho tiempo y esfuerzo. Quizá hoy hubiera considerado otras posibilidades; de hecho, ya se ha logrado una más que aceptable unificación de las tres interacciones débil, electromagnética y fuerte. Pero la gravedad, la más débil de todas ellas, 10^{-33} veces menos intensa que la interacción débil, sigue resistiéndose a todo intento unificador pese a ataques al problema tan ambiciosos como la *teoría M*, 'iniciada' o popularizada por Edward Witten (1951-) en 1995 con la 'segunda revolución' de las supercuerdas.

En cualquier caso, Einstein había manifestado ya abiertamente su decidido rechazo a la ortodoxia cuántica de Bohr y Heisenberg en el quinto congreso de Solvay de octubre de 1927. Ésta fue la gran conferencia sobre la MC (ver detalles en Referencias) que, con el título de *Electrones y Fotones* reunió a 29 participantes de los que 17 ya eran o serían premios Nobel. Los famosos ataques de Einstein a la visión de Copenhague por medio de *Gedankenexperimente*, experimentos imaginarios pero lógicos que parecían contradecir los fundamentos de la MC, desconcertaban inicialmente a Bohr. Pero sólo por unas horas, pues éste siempre lograba resolver la dificultad planteada. Ante uno de ellos, sin embargo, Bohr necesitó toda la noche pero, a la mañana siguiente, explicó triunfante la supuesta contradicción ¡invocando el *principio de equivalencia* de la Relatividad General (RG) del propio Einstein!



*Los artifices de la Interpretación de Copenhague de la Mecánica Cuántica:
Niels Henrik David Bohr (1885-1962, Nobel 1922) y
Werner Karl Heisenberg (1901–76, Nobel 1932, entregado en 1933)*

El desagrado de Einstein surgía porque la MC presenta aspectos probabilísticos que se remontan a la interpretación de Born de la función de onda de Schrödinger. La evolución de la función de onda está regida por la ecuación de Schrödinger y es determinista, pero esta función no es lo que se observa directamente y es en el proceso de la medida donde aparecen las probabilidades. El resultado de un experimento puede ser preciso, pero su predicción adopta una forma estadística: si la

experiencia se repite muchas veces, se obtiene la distribución de probabilidad prevista por la MC que, sin embargo, no permite anticipar el resultado de una única medida. Éste se produce tras el ‘colapso de la función de onda’, fenómeno misterioso desencadenado por la observación (la medida) y que produce un cambio brusco de esa función del que no da cuenta –no puede hacerlo- la ecuación de Schrödinger. Cabe, pues, preguntarse: ¿qué sucede *realmente* cuando se mide un proceso cuántico? ¿qué *realidad* describe la MC? (el lector ya habrá advertido que la palabra ‘realidad’ es la clave de cada pregunta). Ante esta situación, y frente a la ortodoxia de la *interpretación de Copenhague* establecida en el último tercio de la década de 1920 por Niels Bohr¹⁴ y Werner Heisenberg (y por Born), Einstein creía que la MC no proporcionaba una descripción completa de la realidad física. Einstein no era el único disconforme con la visión dominante de la MC: en su día, también manifestaron su incomodidad o desacuerdo otros de sus nobelizados fundadores: Max Planck (1858-1947, Nobel 1918), Louis de Broglie (1892-1987, Nobel 1929) y Erwin Schrödinger (1887-1961, Nobel 1933). Con el paso del tiempo, la postura común entre los físicos ante la extraordinaria capacidad predictiva de la MC (y de su extensión natural, la teoría cuántica de campos), el ‘calcula y no te preocupes de más’, acabó conviviendo con una inquietud ante la estructura interna de la MC que se reflejó en varias propuestas para su modificación (en España, el realismo local einsteiniano fue sostenido por Emilio Santos, de la Univ. de Cantabria y miembro de la RSEF). No hace mucho, por ejemplo, dos extraordinarios científicos han manifestado que la MC no puede considerarse una teoría cerrada: Gerardus ‘t Hoof (1946- , Nobel 1999) ha comentado que “la interpretación más común de la mecánica cuántica tendrá que ser revisada” y Steven Weinberg (1933- , Nobel 1979) afirmaba en 2012 que “no existe una interpretación completamente satisfactoria de la mecánica cuántica”. Ambos han explorado alternativas a la MC convencional.

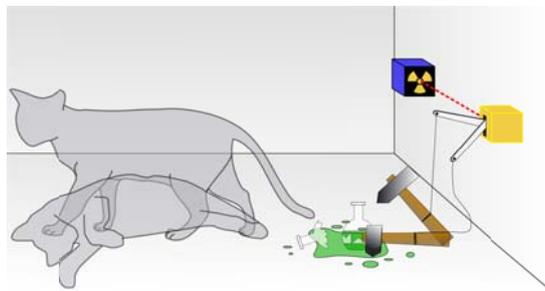
El caso es que, poco después de establecerse en los Estados Unidos, en Princeton, Einstein se preguntó en un famoso trabajo en el *Physical Review* del 15 de mayo de

¹⁴ Es posible que Bohr estuviera influenciado por el *pragmatismo* del filósofo estadounidense William James, que desarrolló en un librito (1907) con ese título. En una entrevista que el historiador y filósofo de la ciencia Thomas S. Kuhn hizo a Bohr, éste reconoció haber leído a James. Ciertamente, en el pasado cabía calificar la visión de Copenhague de ‘pragmática’; hoy, como veremos, indica algo mucho más profundo.

El nombre de *Kopenhagener Geist der Quantentheorie* lo introdujo Heisenberg en el prólogo de su libro sobre los principios de la MC (1930), basado en unas lecturas en Chicago impartidas un año antes. Heisenberg volvió sobre la *interpretación de Copenhague* en 1955, especialmente porque el nombre podía dar a entender que correspondía a un ‘espíritu’ determinado o a una ‘interpretación’ entre otras posibles. Hoy resulta anecdótico reseñar que la interpretación de Copenhague fue tildada de *idealista* por la ortodoxia comunista y que, por ello, no era bien vista en la URSS. Incluso en 1964 un texto soviético de MC como el de Alexander S. Davydov declaraba: “la exposición se basa en el materialismo dialéctico, es decir, en la idea de que las regularidades de la física atómica y nuclear son realidades objetivas de la naturaleza”. En 1967 el físico nuclear británico de origen austríaco Otto Frisch escribió que el debate “presentaba todas las complejidades de una guerra de religión, conversos incluidos: el mayor defensor de la ortodoxia es un comunista [Léon Rosenfeld], y muchos de la oposición son completamente burgueses” (haciendo gala de su habitual causticidad, el Nobel [1945] Wolfgang Pauli había definido a Rosenfeld como la media geométrica $\sqrt{\text{Bohr} \times \text{Trotsky}}$). La famosa escuela de verano de Varenna de 1970 sobre los fundamentos de la MC (la *IL Enrico Fermi School*), en la que John Bell -de quien pronto hablaremos- presentó su *Introduction to the Hidden-Variable Question*, marcó una nueva era; se ha llamado a esa escuela el ‘Woodstock de los disidentes cuánticos’.

1935 junto con Boris Podolsky y Nathan Rosen (EPR): “¿puede considerarse completa la descripción de la realidad que proporciona la mecánica cuántica?” En ese artículo, tras afirmar que “en una teoría completa hay un elemento que corresponde a cada elemento de realidad” y que la “condición suficiente para la realidad de una magnitud física es la posibilidad de predecirla con certeza, sin perturbar el sistema”, EPR concluían que, con esa definición, “la descripción mecánico-cuántica de la realidad física proporcionada por la función de onda no es completa”. Ahora bien, ¿podría ‘completarse’ la teoría cuántica? ¿Sería posible eliminar las inquietantes probabilidades sacando a la luz variables suplementarias aún no consideradas y, por tanto, aún *ocultas*? Al fin y al cabo, se podría predecir la cara de una moneda lanzada al aire si se tuvieran en cuenta todas las variables que determinan su movimiento que, al ignorarse y por tanto quedar ocultas, hacen que su descripción sea *incompleta* y que sólo se pueda asignar un 50% de probabilidad a cada cara. También se podría pensar – en principio- en seguir el movimiento de cada molécula de un gas para conocer las propiedades de éste, aunque la teoría cinética de los gases utiliza la distribución estadística de Maxwell-Boltzmann sin entrar en más detalles. Pero la cuestión en la MC, la *posibilidad* de poder eliminar o no las probabilidades, era conceptualmente muy distinta y requería una respuesta inequívoca. En las últimas líneas de su trabajo, EPR manifestaban su esperanza: “aunque hemos mostrado que la función de onda no proporciona una descripción completa de la realidad física, hemos dejado abierta la cuestión de si tal descripción existe o no. Creemos, sin embargo, que tal teoría es posible”.

Estas cuestiones resultarían hoy esotéricas para la mayoría de los mortales pero, fuera por la fama de Einstein o por existir una mayor curiosidad científica, no lo eran entonces: el *New York Times* del 4-V-1935 se hizo eco del problema incluso antes de que el artículo EPR apareciera publicado. Tras titular “Einstein ataca a la teoría cuántica”, el periódico añadía: “El científico y dos colegas encuentran que no es ‘completa’ aunque sí ‘correcta’ ”. A Einstein no le hizo ninguna gracia la filtración y el *New York Times* tuvo que publicar tres días después una enojada nota suya en la que afirmaba: “toda la información en la que se basa el artículo... le ha llegado sin mi autorización. Tengo por norma discutir cuestiones científicas sólo en los foros adecuados y me opongo a toda publicación anticipada sobre ellas en la prensa secular”. Parece ser que el indiscreto fue Poldolsky y que también corrió a su cargo la redacción final del artículo EPR, con la que Einstein tampoco estuvo del todo satisfecho.



La paradoja del gato de Schrödinger (1935), cuyo futuro está ligado a la liberación de un veneno que depende de un proceso cuántico probabilístico (una desintegración que desencadena la rotura del frasco del veneno)

La dificultad planteada por EPR tenía su origen en que la MC establece que la medida de algunas propiedades de dos partículas, A y B, en ciertos estados ('estados EPR') presenta intensas correlaciones incluso aunque las dos estén tan separadas que la influencia entre ellas resulta imposible. Una de las dos partículas, la A por ejemplo, se comporta como si ya 'conociera' el resultado de una posible medida sobre B para adaptarse a él antes de que se mida sobre A, en contra del carácter probabilístico que toda medida tiene antes de que se realice. El ataque de EPR pilló a Bohr por sorpresa, pero se tomó muy en serio las objeciones planteadas. Bohr respondió enseguida en el *Physical Review* del 15 de octubre de 1935 con un trabajo de título idéntico al de EPR, argumentando que en esos estados EPR no cabía hablar de propiedades *individuales* de cada partícula por lejos que estuvieran entre sí, a la vez que cuestionaba y criticaba el *realismo* de EPR. También intervino ese mismo año otra figura fundamental de la génesis de la física cuántica, el ya citado Erwin Schrödinger. Lo hizo a favor de Einstein en los *Proc. Cambr. Phil. Soc.* y en *Die Naturwissenschaften*, introduciendo su famoso gato (que, de acuerdo con la MC, parece estar vivo y muerto en una superposición de ambos estados hasta que el observador decide abrir la caja que lo encierra); W. H. Furry (conocido por el teorema de Furry de la electrodinámica cuántica) terció en 1936, en contra de Einstein y en el *Physical Review*. Pero Einstein permaneció irreductible: aunque no cuestionó las predicciones de la MC, se negó a aceptar la completitud de su estructura. En 1941 Wheeler visitó a Einstein en su casa de Princeton para explicarle la teoría de la 'suma sobre las historias' que había desarrollado con Richard Feynman (Nobel 1965), "con la esperanza de convencerle de la naturalidad de la teoría cuántica vista desde esa perspectiva". Tras escucharle atentamente, Einstein repitió su habitual crítica a los aspectos probabilísticos: "Dios no juega a los dados". Y a continuación añadió con ironía: "por supuesto, puedo equivocarme; pero quizá me he ganado el derecho a cometer mis propios errores". En 1944, en carta a Max Born, Einstein insistía aludiendo de nuevo al carácter probabilístico de la MC: "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". Y en otra carta a Born concluía: "me inclino a pensar que la descripción dada por la mecánica cuántica es una descripción incompleta e indirecta, destinada a ser reemplazada más tarde por otra exhaustiva y directa". Esta íntima convicción, siempre mantenida, contribuyó sin duda a su progresivo aislamiento científico.

Sin embargo, no sólo Einstein tenía dificultades con la interpretación de Copenhague; como se ha mencionado, el problema de la medida en la MC y el carácter estadístico de sus predicciones siempre ha suscitado incomodidad entre los físicos. Hugh Everett III, por ejemplo, introdujo en 1957 en su tesis (dirigida por Wheeler) y en el *Review of Modern Physics*) los multi-universos (*multiversos*) en los que todos los posibles resultados de una medida tienen lugar, aunque en distintas ramificaciones del universo; en esa visión, la MC requiere una creciente multitud de universos. Pero, al margen de su constante y sucesiva creación, como lo que sucede en uno es ajeno a lo que sucede en los demás, cabría objetar simplificando que esos mundos resultan superfluos por lo que, en realidad, seguimos donde estábamos. Aunque en la formulación de Everett la función de onda evoluciona unitariamente, sin colapso, parece paradójico introducir una multitud de universos para explicar las peculiaridades

de uno solo; no obstante, no es la única teoría física donde aparecen múltiples universos. En cierta ocasión, Paul A. M. Dirac (1902-1984, Nobel 1933) se excusó por no haber identificado ciertas soluciones de su ecuación (1928) con los positrones (Dirac pensó en el protón) porque “entonces no se postulaban nuevas partículas con tanta facilidad”. Dirac perdió la oportunidad de predecir el positrón, descubierto en 1932. Recordando esta anécdota me pregunto si la idea de Everett fue menos revolucionaria de lo que parece; como se ha mencionado, la física actual no es ajena a la introducción de multiversos (nota 23). En cualquier caso, Bohr no apreció en absoluto la visión de Everett cuando éste le visitó en Copenhague en 1959 (ni Rosenfeld, ver nota 14).

La interpretación de Copenhague presenta otra dificultad básica: el mundo microscópico se rige por la MC, pero el aparato de medida y el observador siguen las leyes la física clásica, estableciéndose así una misteriosa diferencia de tratamiento (dualismo que Weinberg ha calificado de ‘absurdo’) pese al carácter cuántico de la Naturaleza en su conjunto¹⁵. Una forma de evitar esta dificultad es tener en cuenta que si bien en el formalismo cuántico rige el principio de superposición como implica la ecuación de Schrödinger, no es así en nuestra ‘realidad clásica’; los sistemas clásicos no están aislados del entorno, y por tanto no cabe utilizar para ellos la ecuación de Schrödinger, que sólo es aplicable a un sistema cerrado. No hay estados cuánticos que sean superposición de estados macroscópicos como con el gato de Schrödinger. De hecho, el fenómeno de la *decoherencia* (que destruye la ‘coherencia’ de la superposición cuántica), la transición entre los dominios cuántico y clásico como resultado de la interacción irreversible del sistema cuántico con el entorno, determina que todos los gatos son clásicos¹⁶. La decoherencia fue introducida por H.D. Zeh en 1970 y estudiada especialmente por Wojciech H. Zurek y otros a partir de los ochenta, siendo un activo campo de estudio. La decoherencia afecta, por ejemplo, a la estabilidad de los elementos que constituyen los *qubits* (*quantum bits*) en los ordenadores cuánticos, lo que constituye el mayor obstáculo para el progreso de la computación cuántica.

Quizá por todas estas dificultades el físico norirlandés John S. Bell, de quien ahora hablaremos, llegó a decir en 1966 que la estructura interna de la MC “llevaba en sí misma el germen de su propia destrucción”. No obstante, como la extraordinaria precisión de la MC estaba –y está– fuera de duda, el debate sobre sus fundamentos suscitado por EPR parecía puramente académico y, durante mucho tiempo, fue ignorado por la gran mayoría de los físicos, sólo interesados en la exactitud de las predicciones. Pero todo cambió en 1964 cuando Bell encontró sus famosas

¹⁵ La emergencia de la física clásica a partir de la cuántica en el límite clásico, cuando el efecto de la constante de Planck h es despreciable, es un ejemplo de los límites singulares a los que se ha referido (2002) Michael Berry: en general, las *viejas* teorías físicas aparecen como límites singulares de las *nuevas* teorías físicas. La singularidad de los límites se manifiesta en que las dos teorías, nueva y vieja, son muy diferentes cualitativamente: es el caso del límite clásico ya citado y el del límite $v/c \rightarrow 0$ que nos lleva de la mecánica einsteiniana a la newtoniana (y del grupo de Poincaré al de Galileo), etc.

¹⁶ La *decoherencia* impide la existencia de un estado cuántico de un gato dado por la superposición lineal $|\psi_g\rangle = 1/\sqrt{2}(|\text{gato vivo}\rangle + |\text{gato muerto}\rangle)$; con independencia de que lo comprobemos o no, el gato está vivo o está muerto. El estado $|\psi_g\rangle$ no puede factorizarse (como refleja el supuesto entrelazamiento de los gatos vivo y muerto) y no tiene ‘vida’ definida. $|\psi_g\rangle$ es inadecuado para describir el gato, que es macroscópico: al no poderse aislar del entorno, la interacción resultante destruye toda posible coherencia.

desigualdades visitando la Univ. de Brandeis. En un primer artículo de seis escasas páginas en el primer número de la efímera revista *Physics*, Bell –que se consideraba a sí mismo un ‘ingeniero cuántico’– mostró que si se aceptaba la tesis de EPR y se completaba el formalismo con variables suplementarias originalmente ocultas, el resultado era incompatible con las predicciones estadísticas de la MC. Las desigualdades de Bell implican el llamado *teorema de Bell* que, en sus propias palabras, establece que “si una teoría de variables ocultas es local no estará de acuerdo con la mecánica cuántica, y si lo está no será local”: el acuerdo no es compatible con el *realismo local*. Según éste, las propiedades físicas de un objeto son



*John Stewart Bell (1928-1990), FRS,
honoris causa en su alma mater, la Queen's University de Belfast*

independientes de la observación (*realismo*) y no hay influencias que se propaguen más velozmente que la luz (*localidad*). En relación con las variables ocultas hay que recordar que éstas habían caído en descrédito inicialmente tras el famoso libro de John (János) von Neumann¹⁷ de 1932 que, bajo ciertas hipótesis aparentemente plausibles, parecía establecer su imposibilidad en la MC. Sin embargo, en un artículo de 1996 en el *Review of Modern Physics*, poco antes del de *Physics*, Bell ya había señalado que alguna hipótesis de la prueba de von Neumann no era aplicable a la MC con las variables ocultas del análisis de Einstein, lo que invalidaba la conclusión. Según el físico David Mermin, Bell diría más tarde en la revista *Omni* (mayo 1988): “*you may quote me on that: the proof of von Neumann is not merely false but foolish!*” (“no me importa que me cite: la prueba de von Neumann no es simplemente falsa: ¡es estúpida!”). Así pues, tenía sentido plantearse si las variables ocultas podían ‘completar’ la MC estudiando las implicaciones de su posible presencia.

Bell, que llegó a estar propuesto para el Nobel el año de su muerte (y que lo hubiera recibido de haber vivido más tiempo), dio forma matemática a las implicaciones del razonamiento del artículo EPR. Asumiendo que no existe interacción entre los sistemas de medida por estar suficientemente separados (el resultado de una medida en uno no puede comunicarse al otro a tiempo de influir sobre la medida en éste, hipótesis de *localidad*) Bell encontró, sin hacer referencia a situaciones demasiado particulares, que

¹⁷ *Mathematische Grundlagen Der Quantenmechanik* (1932). El libro se publicó por el CSIC en 1949 traducido por Ramón Ortiz Fornaguera (de la entonces Junta de Energía Nuclear, hoy CIEMAT), seis años antes de que apareciera la versión inglesa (Princeton).

las correlaciones predichas por los modelos de variables ocultas están limitadas por ciertas desigualdades que no son cumplidas (son violadas) por las predicciones de la MC. Las *desigualdades de Bell* y muy especialmente en la forma de Clauser, Horne, Shimony y Holt de 1969, quienes sugirieron medir la correlación de la polarización de pares de fotones, ópticos o casi, así como otras posteriores, permitían de pronto realizar una *comprobación experimental* de la cuestión *teórica* suscitada por EPR. Desde ese momento, la elección entre la epistemología cuántica de Bohr por un lado y la de Einstein por otro –el citado *realismo local*– había dejado de ser una cuestión estética o filosófica para pasar a ser *decidible* experimentalmente. Muchos experimentos, incluido el famoso de Alain Aspect *et al.* de 1982, han confirmado desde entonces la violación de las desigualdades de Bell y la validez de la MC ‘ortodoxa’. En particular, el entrelazamiento de dos partículas, por ejemplo dos fotones entrelazados por su polarización, *no* puede entenderse como una correlación convencional entre los dos fotones en la que las propiedades de ambos, resultado de una preparación común, permanecen vinculadas *a cada uno* de ellos tras su separación como integrantes de *su propia* realidad física; ello es debido a la *no* factorizabilidad de los estados EPR (fue Schrödinger quien introdujo el término original, *Verschränkung*¹⁸). La MC predice que las medidas sobre dos fotones entrelazados dan lugar a resultados individuales aleatorios, pero con fuertes correlaciones entre ellos, que violan las desigualdades de Bell que se obtienen cuando se introducen variables ocultas para explicar *todas* esas correlaciones cuánticas. La MC no es ‘completable’ como sugería el trabajo EPR y, en consecuencia, no es posible entender las propiedades de los estados entrelazados en el esquema que preconizaba Einstein de una realidad física, causal y localizada en el espacio y en el tiempo.

De hecho, en 1998 se realizó un experimento utilizando la red de fibra óptica de la compañía suiza de teléfonos en el que la fuente (en Cornavin) estaba a más de 10 kms de los dos detectores (en Bellevue y Bernex), pese a lo cual los fotones entrelazados enviados por fibra óptica mostraron la violación de las desigualdades de Bell de acuerdo con las predicciones de la MC. La interrelación se mantiene cuando la separación de las partículas es de tipo ‘espacial’ en el sentido relativista del término, es decir, cuando según la relatividad una partícula no podría influir sobre la otra. Para Einstein esta situación reflejaría una “fantasmal acción a distancia” (“*spooky action at a distance*” o “*spukhafte Fernwirkungen*”): como hemos discutido, la medida sobre una de esas dos partículas, cuyo resultado es estadístico, influye sobre la otra, condicionando (correlacionando) el resultado de la medida sobre ésta con independencia de la distancia que las separe. No obstante, esto no permite la transmisión superlumínica de una señal ‘práctica’ con información que contradiga la relatividad: la información requiere soporte físico y, como la energía, no puede propagarse con velocidad superior a la de la luz.

¹⁸ La palabra alude a esa falta de factorizabilidad de los estados EPR; también se les llama ‘enmarañados’, ‘ensamblados’, ‘intrincados’ y ‘enredados’ aunque lo mejor, física y gramaticalmente, es *entrelazados*. En 1935, en el artículo de *Die Naturwissenschaften* ya citado, Schrödinger afirmó que “el entrelazamiento no era un aspecto más, sino *el* característico de la mecánica cuántica”. Tanto es así que el hecho de que los estados entrelazados no se puedan escribir como producto de los estados individuales basta para que haya violación de desigualdades de Bell. Como N. Gisin (que ha participado en uno de los 3 experimentos *loophole free* que se mencionarán a continuación) probó en 1991, “*any non-product state of two-particle systems violates a Bell inequality*”.

Las peculiaridades del entrelazamiento no implican que la MC sea inaceptable, sino que el mundo físico es extraordinariamente peculiar y –una vez más- no apto para visiones antropomorfas¹⁹. No cabe argumentar que la descripción cuántica es incompleta como sostenía Einstein y que puede haber alguna información o parámetros ocultos que, propagándose con cada uno de los dos fotones, explicaría la aparente influencia de uno de los fotones entrelazados sobre el otro. Si así sucediese, ésta sería resultado de nuestro desconocimiento de esa información, pues el efecto quedaría explicado conociendo las variables ocultas que darían cuenta de él. Pero eso no es posible, pues el ‘teorema de Bell’ citado excluye precisamente las variables ocultas locales que podrían utilizarse para ‘completar’ la teoría cuántica tal como deseaba Einstein: ninguna teoría de variables ocultas puede reproducir las predicciones del formalismo de la MC que se observan experimentalmente. Así pues, la violación experimental de las desigualdades de Bell indica que dos fotones entrelazados por su polarización *no* se comportan como dos sistemas *diferentes*, sino que deben ser tratados como un sistema *único*, descrito por una función de onda *global* que *no puede factorizarse* en estados de un solo fotón por muy distantes que estén uno del otro. La lógica clásica no es aplicable a la MC: las propiedades de los dos fotones entrelazados *pertenecen globalmente a ambos*. Cabe hablar, por tanto, de una falta de localidad cuántica, de ‘totalismo cuántico’ o ‘*quantum holism*’: el entrelazamiento es una propiedad global.



Juan Ignacio Cirac Sasurain

En resumen: el realismo local de Einstein no es sostenible, el formalismo de la interpretación de Copenhague sobrevive y no sólo FAPP, *for all practical purposes*, en expresión del propio Bell. Pero hoy resulta evidente que esa ‘interpretación’ no puso punto final a la comprensión y desarrollo de la MC. Los actuales avances han dado lugar a la aparición de un nuevo campo, vagamente definido como *información cuántica* y que incluye la criptografía y la computación cuánticas, al que, por cierto, el

¹⁹ ¿Por qué las leyes de la Naturaleza tendrían que ser benévolas con nuestras modestas capacidades? Es conveniente recordar que, dadas las limitaciones de nuestros sentidos (tenemos ojos y no microscopios electrónicos y, además, nos movemos con velocidades pequeñas, no como partículas en un acelerador), *nuestra percepción sensorial es necesariamente clásica y newtoniana*, lo que dificulta o incluso imposibilita nuestra intuición *fuera de esos dominios*. Éste es el origen, dicho sea de paso, del erróneo apriorismo kantiano ya citado. De hecho, si la evolución darwiniana ha condicionado nuestro razonar, y es seguro que sí, ha sido para hacerlo newtoniano y clásico, no einsteiniano ni cuántico. Por eso la física cuántica y muchos aspectos de la relatividad (como la pérdida del carácter absoluto del tiempo y espacio newtonianos) son contrarios a nuestra intuición. Para llegar a esas teorías hemos tenido que superar las limitaciones de nuestros sentidos, complementándolos con medios externos ajenos a ellos.

Es curioso recordar que, *a contrario sensu*, algunos post-kantianos llegaron a declarar en su día que la relatividad einsteiniana debía de ser falsa... *a priori*.

español Ignacio Cirac, director de la división teórica del Instituto Max Planck de Óptica Cuántica de Garching y miembro de la RSEF, ha hecho esenciales y pioneras contribuciones. Y hace muy poco, un equipo dirigido por Eugenio Coronado, director del Instituto de Ciencia Molecular (ICMol, Univ. de Valencia) y también miembro de la RSEF, ha dado un paso más hacia los ordenadores cuánticos y la superconductividad en dos dimensiones en sendos artículos en *Nature* y *Nature Comm*. La curiosidad por la computación cuántica ha ido creciendo desde las ideas iniciales de Feynman de 1982 hasta transformarse en el extraordinario interés actual, espoleado por el algoritmo de factorización formulado por Peter Shor en 1994: de nuevo, una revolución conceptual va a conducir a una gran revolución tecnológica. No obstante, resulta curioso recordar que la motivación de Bell fue reivindicar a Einstein y no ir en contra suya: “para mí, lo razonable es suponer que los fotones en esos experimentos [EPR] incorporan programas, que han sido correlacionados de antemano, que les indican cómo comportarse. Esto es tan racional que pienso que cuando Einstein lo vio y los demás rechazaron verlo, él era la persona racional. Los demás estaban metiendo la cabeza bajo la arena... La superioridad de Einstein sobre Bohr en este punto era enorme; un vasto golfo entre quien veía claramente lo que era necesario, y el oscurantista”. Y concluía Bell: “es una lástima que la idea de Einstein no valiese; lo razonable, simplemente, no funciona”. Para Bell, la postura adecuada para un científico era el realismo pero, como tal, aceptaba una ‘realidad’ superior, última: la tozuda realidad de los resultados experimentales, le pareciera o no ‘razonable’.

Durante un tiempo, los defensores de las teorías de variables ocultas locales trataron de salvar el realismo local, pese a todo, argumentando que los experimentos –que rápidamente habían convergido en su contra- presentaban ‘huecos’ no cerrados, por lo que no eran concluyentes del todo. Sin embargo, el propio Bell ya decía en 1980: “me resulta difícil creer que la mecánica cuántica, que funciona tan bien en las situaciones prácticas [FAPP!], vaya a fallar estrepitosamente por aumentar la eficiencia de los contadores” (la precisión del experimento). Pero en 2015 no sólo se han observado las ondas gravitatorias: una serie de experimentos ‘*loophole free*’ (sin hueco o escapatoria), realizados ese mismo año, han cerrado el escasísimo margen que todavía quedaba para poder rechazar la violación experimental de las desigualdades de Bell. Hasta ahora, los intentos de preservar el realismo local de Einstein estaban basados (pese al comentario anterior de Bell) en que los experimentos no eran concluyentes del todo por tener una precisión insuficiente –el ‘*precision loophole*’- o por presentar el ‘*locality loophole*’, éste de carácter más fundamental. Cerrar este segundo ‘hueco’ requería disponer el esquema experimental de forma que el principio relativista de causalidad repetidamente mencionado –que ninguna influencia puede propagarse más deprisa que la luz- impidiera que la medida de un fotón pudiera relacionarse causalmente con la del otro (tuvieran una separación de tipo ‘espacial’). Esto era, precisamente, lo que había conseguido el dispositivo experimental de Aspect *et al.* de 1982. Experimentos más precisos habían tapado también el ‘agujero’ de la insuficiente detección; así pues, ambos huecos estaban ya cerrados... pero cada uno en experimentos distintos, no simultáneamente en una única experiencia.

Sin embargo, tres experimentos realizados en 2015 en la Univ. holandesa de Delft (liderado por Ronald Hanson), en la de Viena (Anton Zeilinger) y en el *National Institute of Standards and Technology* (el NIST de Boulder, Co., Lynden K. Shalm), han cerrado definitivamente, al hacerlo a la vez en cada uno de ellos, el *detection loophole* y el

locality loophole en la violación de las desigualdades de Bell (y, también, el *freedom of choice loophole* o 'libertad de elección' independiente de los esquemas *-settings-* de medida, generados al azar). Los resultados del primer experimento, con electrones entrelazados por el espín, aparecieron en *Nature*. Los otros dos, con fotones, se publicaron en sendos *Phys. Rev. Letters*, y los tres han contado con la participación de científicos del Instituto de Ciencias Fotónicas de Barcelona y del ICREA (C. Abellán, W. Amaya, V. Pruneri y M.W. Mitchell). Así pues, lo que queda ahora es averiguar hasta dónde puede llegar la *magnitud* de la violación de las desigualdades de Bell, lo que también tiene interesantes consecuencias. En la versión de Clauser-Horne-Shimony-Holt ya citada, la violación se observa midiendo un parámetro S , que está relacionado con las correlaciones de las medidas en dos lugares distintos y cuyo valor absoluto no puede valer más de dos, $|S| \leq 2$; por otra parte, la propia MC establece que la violación de esa desigualdad tiene una cota superior $|S| \leq 2\sqrt{2} \sim 2.82843$ (el límite de B. S. Cirel'son, 1980). Un experimento de 2015 realizado en la Univ. de Singapur y publicado también en el *Phys. Rev. Letters*, en el que ha colaborado el español Adán Cabello de la Univ. de Sevilla y miembro de la RSEF, ha encontrado para un par de fotones entrelazados el valor $S \sim 2.8276$, muy próximo a la cota de Cirel'son. Este valor, que constituye la máxima violación de las desigualdades de Bell encontrada hasta la fecha, viola también otro límite, el de A. Grinbaum (establecido en 2015), que es de 2.82537. Este límite se obtiene a partir de consideraciones matemáticas muy generales basadas en la teoría de códigos algebraicos e integrando al observador en el esquema. Esta violación tiene interés porque la imposibilidad de superar la cota de Grinbaum podría apoyar la idea de que la MC sólo es una descripción 'efectiva' *i.e.*, una buena aproximación de otra teoría de carácter más fundamental.

Todos los *tests* citados confirman que las peculiares propiedades de la MC son parte esencial y no evitable de la misma y que, como Bohr sostuvo contra Einstein en la larga polémica que mantuvieron durante sus vidas, poseen un carácter fundamental. ¿Ha muerto el realismo local tras los tres *loophole-free Bell tests* citados? Ciertamente, los tres experimentos lo rechazan. Por supuesto, todo experimento tiene sus limitaciones y puede mejorarse. Pero, mientras no haya razón para lo contrario –y no la hay, creo, si nos resistimos a nuestro instintivo y clásico razonar (nota 19)- hay que aceptar los resultados como el propio Bell hizo en su día a su pesar, sin recurrir a medios extraordinarios para salvar ese realismo local (ésta es la posición actual del español Emilio Santos). Por ejemplo, la insistencia en torno a una 'conspiración de las correlaciones', o en un supuesto 'superdeterminismo', genera a su vez otros problemas como la implícita renuncia a descubrir las leyes de la Naturaleza por medio de la experimentación: retrocediendo suficientemente en el tiempo, dos acontecimientos causalmente separados tendrían un pasado común que podría invocarse para cuestionar su independencia y, en el caso de seres humanos, hasta su libertad recíproca de acción. En cualquier caso, sí hay algo sobre lo que hoy no cabe duda alguna: si bien Einstein se resistió a aceptar del todo la MC pese a ser uno de sus creadores y contribuir a ella de forma esencial, sus objeciones fueron la raíz de una parte importantísima de su posterior desarrollo, que cabe calificar con toda justicia de *segunda revolución cuántica*²⁰. Si a los experimentos mencionados sumamos la

²⁰ La extraordinaria importancia de esta revolución, incluida la económica, puede apreciarse en el *Quantum Manifesto*, <http://qurope.eu/manifesto>, cuyo objetivo es formular una estrategia común europea para que Europa se mantenga en la primera línea de la investigación y tecnologías cuánticas. El

detección directa de las ondas gravitatorias ya consideradas, podemos concluir que para la bodega de la física 2015 ha sido –como cantaba Frank Sinatra- “*a very good year*” y que Einstein, directa e indirectamente, tuvo muchísimo que ver en la cosecha de ese año.

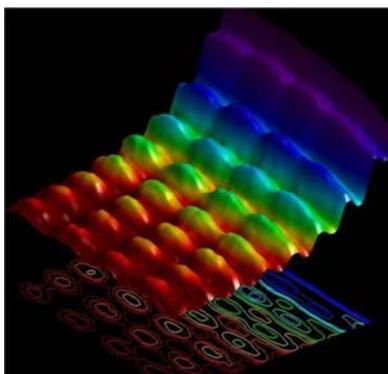
V. El legado de Albert Einstein

Einstein gozó de una popularidad extraordinaria, sobre todo tras la confirmación en 1919 de la desviación de la luz estelar por el Sol predicha por la RG. Asediado por periodistas y fotógrafos, llegó a comentar que su profesión era la de ‘modelo masculino’. Como si de un oráculo se tratase, respondía complacido a las preguntas más dispares. En el ámbito familiar, sin embargo, Einstein no alcanzó cotas elevadas: ni siquiera su dedicación a la ciencia permite excusar algunos aspectos de su comportamiento. En lo social, Einstein se inclinaba por la socialdemocracia, mostrando una gran preocupación e integridad; como dijo el físico-químico y novelista Charles Percy Snow (1905-80, famoso por la conferencia Rede de 1959 sobre *Las dos Culturas*), Einstein era *unbudgeable*, inamovible. También tuvo que enfrentarse a situaciones extremas ante las que tuvo que tomar partido: el 2-VIII-1939 abandonó su probado antibelicismo para escribir al presidente Roosevelt la carta que contribuyó a iniciar el proyecto Manhattan de la bomba atómica. Finalizada la guerra, Einstein regresó a sus convicciones pacifistas; en 1955, sólo días antes de su muerte el 18 de abril y en plena guerra fría, firmó un manifiesto con Bertrand Russell (1872-1970, Nobel de Literatura 1950) que daría lugar a las conferencias de Pugwash. Su conciencia determinó su conducta pública: Einstein censuró severamente el régimen de Stalin, la segregación racial en Estados Unidos como “enfermedad de los blancos, no de los negros” y criticó el macartismo, al que oponía la resistencia civil. En 1952 rechazó la presidencia de Israel: “conozco algo sobre la Naturaleza, pero prácticamente nada sobre los hombres”, sentenció para explicar su renuncia al poder. Aceptada literalmente esa razón (para lo que habría que olvidar su manifiesta tendencia a pronunciarse sobre todo lo humano haciendo suyo el dicho de Terencio), la frase podría explicar su bienintencionada pero utópica creencia en la necesidad de un gobierno universal. Hubiera sido interesante conocer su opinión, si llegó a leerlo, sobre el *1984* de Orwell, quien tenía una visión mucho más sombría de los supergobiernos. Quizá las bases evolutivas de la naturaleza humana, nada proclives al ideal rousseauiano del buen salvaje, o la teoría de la evolución en general, no suscitaron el interés de Einstein; sí habían atraído antes –y mucho- a uno de los dos padres de la física estadística, el gran Ludwig Boltzmann (1844–1906), 35 años mayor que Einstein y admirado por éste. Quién sabe; si Einstein hubiera tenido el mismo interés que Boltzmann por la teoría de la evolución, quizá su defensa del realismo no hubiera sido tan tenaz (nota 19).

manifiesto se hará público el próximo 17-18 de mayo en la *Quantum Europe Conference* que tendrá lugar en Ámsterdam, en cooperación con la Comisión Europea y el *QuTech Center* de Delft ya citado.

Para que nadie dude del extraordinario rendimiento económico de la ciencia básica, cuyo progreso se debe a la *pura curiosidad* de los científicos, bastará recordar que las tecnologías que son posibles gracias a la mecánica cuántica representan la tercera parte del GNP de Estados Unidos, lo que es generalizable a Occidente en su conjunto.

Concluimos ya. Todos los grandes avances de la física moderna –relatividad especial, RG, teoría cuántica, cosmología- nacieron en el primer tercio del siglo XX. Las contribuciones de Einstein a la primera fueron mayores que las de cualquier otro científico por no decir, simplemente, que fue él quien creó la relatividad *especial*²¹. Por el contrario, la relatividad *general* hubiera tardado mucho tiempo en aparecer de no haber existido Einstein. Sus aportaciones a la física cuántica fueron fundamentales en su creación²² y determinaron buena parte de su desarrollo posterior, hasta cuando criticó sus fundamentos. Mencionaremos aquí sólo otras dos aportaciones suyas. La primera, la emisión inducida, tiene extraordinarias consecuencias prácticas y constituye otro ejemplo –uno más- de cómo la ciencia pura genera automáticamente aplicaciones (ver nota 20). Einstein estableció esa hipótesis en *Zur Quantentheorie der*



La primera 'foto' de la luz mostrando su naturaleza dual como partícula y onda
(2015 ©Fabrizio Carbone/EPFL)

Strahlung (Sobre la teoría cuántica de la radiación, 1917) aunque, como saben los historiadores, la introdujo un año antes en una oscura revista de Zúrich. La emisión inducida constituye nada menos que la base del funcionamiento del láser. Así lo recuerdan las iniciales de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*; el primer láser funcionó en 1960. La otra contribución que reseñaremos fue estimulada por un trabajo (*Planck's law and the hypothesis of light quanta*) que Satyendra Nath

²¹ Estuvieron cerca de ella, pero no llegaron, el gran matemático francés Henri Poincaré (1854-1912), quien en un discurso pronunciado en St. Louis en 1904 (*L'État actuel et l'avenir de la physique mathématique*) ya habló del 'principio de relatividad', y el físico holandés Hendrik A. Lorentz (1853–1928, Nobel 1902), que Einstein siempre veneró como una figura paterna.

²² Y, como en todo lo concerniente a los inicios de la física cuántica, revolucionarias. En la introducción de su trabajo *Un punto de vista heurístico sobre la producción y transformación de la luz* (el del efecto fotoeléctrico, 1905) decía: “cuando la luz parte de un punto, su energía no se distribuye continuamente en un espacio cada vez mayor, sino que consiste en un número finito de cuantos de energía que están localizados en puntos del espacio, se mueven sin dividirse y pueden absorberse o generarse sólo como un todo” [mis cursivas]. Los *Energiequanten* o *Lichtquanten* acabaron siendo *corpúsculos* luminosos con todos sus atributos (energía y momento) bastantes años después; Einstein ya propugnaba en 1909 una “*fusión de la teoría ondulatoria y de emisión [corpúscular] de la luz*”. El nombre de *fotón* es de 1926 y se debe al químico-físico Gilbert Newton Lewis; quizá debió llamarse ‘einsteinión’, pero *fotón* era etimológicamente muy apropiado y enseguida se hizo popular. Para entonces Arthur H. Compton (1892-1962, Nobel 1927) ya había dado la prueba definitiva (1923) de su existencia al estudiar la dispersión de la luz (el choque elástico de un fotón y un electrón libre, tratado como si se tratara un choque de canicas relativistas) usando la relatividad y la física cuántica: “el apoyo experimental de la teoría indica convincentemente que el cuanto de radiación posee momento en una dirección al igual que energía”. Pero hubo que esperar al mencionado quinto congreso Solvay (octubre de 1927, ver nota 14 y Referencias) para que el fotón quedara finalmente consagrado y aceptado.

Bose (1894-1974) envió a Einstein en 1924; en su carta, Bose se presentaba ante él como admirador suyo y como el traductor al inglés, en la India, de los artículos de Einstein de relatividad. Éste, a su vez, tradujo al alemán el artículo de Bose, que apareció ese mismo 1924 en *Zeitschrift für Physik*. Einstein extendió enseguida (1924, 1925) las ideas de Bose sobre los cuantos de luz a las moléculas de un gas ideal, dando así origen a la que hoy se conoce como la estadística cuántica de Bose-Einstein; después se demostró que era la adecuada para explicar el comportamiento de un agregado de partículas de espín entero. Se denominan *bosones* las partículas que se rigen por la estadística de Bose-Einstein, que son de espín entero; la otra estadística cuántica, la de Fermi-Dirac, es la que obedecen los *fermiones*, de espín semientero. La

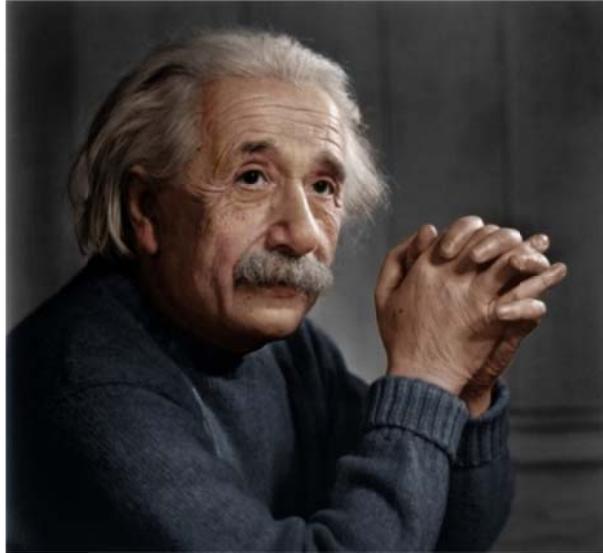


Satyendra Nath Bose en 1925

estadística cuántica de B-E condujo a nuevos resultados como la condensación de Bose-Einstein, tendencia que presentan algunas moléculas bosónicas a acumularse (condensarse; la palabra recuerda la condensación del vapor en líquido) por debajo de una cierta temperatura y en un mismo estado de la menor energía posible. El fenómeno, que da lugar a una nueva forma de materia, constituye una manifestación *macroscópica* de un efecto cuántico, y es muy importante en sí mismo y por sus potenciales aplicaciones. Fritz London lo utilizó pronto (1938) para explicar ciertas propiedades del helio líquido ^4He , cuyo núcleo es un bosón (el isótopo ^3He es un fermión y por tanto no presenta ese comportamiento). Hace no muchos años, Eric A. Cornell, Wolfgang Ketterle y Carl E. Wieman recibieron el Nobel de 2001 “por obtener la condensación de Bose-Einstein en gases diluidos de átomos alcalinos y por estudios pioneros fundamentales de las propiedades de los condensados”. Y, finalmente, para concluir con la relevancia de las aportaciones de Einstein bastará decir, volviendo a la RG, que el extraordinario desarrollo de la cosmología hubiera sido sencillamente imposible sin la relatividad general.

Sin embargo, pese a haber alcanzado éxitos tan absolutamente extraordinarios –o quizá por ello- la independencia de criterio de Einstein, que tan útil le había sido en su razonamiento físico, le indujo hacia la mitad de su vida a continuar solo su camino. En buena medida, Einstein fue un solitario científicamente, aunque en su período europeo y en sus viajes estuvo en contacto con los mejores físicos de su tiempo; en aquella época, las conferencias de Solvay –por ejemplo- bastaban para reunir cada año en el hotel Metropole de Bruselas a casi todos. Después, ya en los Estados Unidos, Einstein fue simplemente un *outsider*; si bien tuvo algunos colaboradores, no dejó escuela, aunque quizá fuera más propio decir que su escuela fue universal. Pero ese aislamiento final autoimpuesto no rebajó un ápice su estatura científica: nadie, ni

siquiera él, pudo acertar siempre -o del todo- ante problemas tan profundos como los que ocuparon su mente, y hasta en sus ocasionales empecinamientos acertó al señalar con ellos las dificultades más importantes. Sobre sus logros, como por ejemplo las ecuaciones de la RG, sólo cabe una admiración semejante a la que Feynman expresó frente a las de Maxwell del electromagnetismo: “con el paso del tiempo, incluso la guerra civil americana quedará reducida a una insignificancia provinciana comparada con este descubrimiento de la misma década” (la de 1860). Pues, como bien dijo el propio Einstein, “la política es para el momento; una ecuación es para la eternidad”.



1879-1955

En el siglo que ha transcurrido desde la RG, la física ha realizado enormes avances en el camino de la unificación y la geometrización de las leyes Naturaleza que el propio Einstein trazó. Los problemas fundamentales que él no pudo resolver determinan todavía la frontera del conocimiento: en ella se sitúa la unificación de la gravedad con las demás fuerzas así como la naturaleza y el valor de la constante cosmológica²³, a lo que hay que añadir la teoría cuántica de la gravedad. Hoy, Einstein seguiría con enorme interés y no menos asombro los avances de la *segunda revolución cuántica* y sus ramificaciones: manipulación de objetos cuánticos individuales, relojes de casi infinita precisión, criptografía y computación cuánticas y un largo etcétera. Por todo ello, ante la envergadura de los retos planteados y frente a la actual banalización del conocimiento y la Cultura, cabe concluir recordando lo que el propio Einstein afirmó en

²³ Como ya mencionamos, la constante cosmológica se considera vinculada a la densidad de la ‘energía oscura’ que constituye en torno al 70% del universo. La dificultad surge porque si se calcula la contribución del vacío cuántico por los métodos de la teoría cuántica de campos se obtiene un valor que excede entre 60 y 120 órdenes de magnitud el máximo permitido por la observación (Yakov B. Zel’dovich fue el primero en hacer una estimación de la ‘energía del punto cero’ en 1967-68 y observar la gran discrepancia). De ser cierto el valor calculado, la aceleración de la expansión sería muchísimo mayor que la observada. Ambas densidades de energía, la oscura *observada* del ‘vacío’ cosmológico y la *calculada* para el ‘vacío’ cuántico, están en un desacuerdo tan profundo que señala una dificultad fundamental: es el *problema de la constante cosmológica*. Entre las variantes inflacionarias, la teoría del *multiverso* inflacionario, que trata de unir la cosmología inflacionaria, la física de partículas y el principio antrópico trata de abordar este problema; quizá la teoría de cuerdas pueda contribuir a la solución (en ella hay cabida para un elevadísimo número de constantes cosmológicas), pero el hecho es que por ahora ni siquiera hay rastro de supersimetría.

1952 y le es aplicable a él mismo: “sólo hay unas cuantas personas ilustradas con una mente lúcida y un buen estilo en cada siglo. Su legado es uno de los tesoros más preciados de la humanidad”.

Referencias

Existen ya varias recopilaciones de todos los trabajos y de muchos escritos de Einstein, con traducción al inglés en su caso, en:

- Univ. de Princeton: [The Collected Papers of Albert Einstein](#) (CPAE);
- CalTech: *The Einstein Papers Project*, <http://www.einstein.caltech.edu/> ;
- Universidad Hebrea de Jerusalén: *Los archivos de Albert Einstein*²⁴, <http://www.albert-einstein.org/archives5.html>

Hay un sinnúmero de biografías y libros sobre Einstein, entre los que destaca la biografía científica de Abraham Pais, *Subtle is the Lord: The science and the life of Albert Einstein*, Oxford Univ. Press (1982; trad. española *El señor es sutil*, Ariel, 1984) y *Einstein Lived Here*, también de A. Pais (Oxford Univ. Press, 1994).

Un recorrido por la ciencia y la época de Einstein se puede encontrar en mi libro *En torno a Albert Einstein, su ciencia y su tiempo*, Servicio de Publicaciones de la Univ. de Valencia, 2ª ed. (2006) 328 págs., ISBN: 84-370-6599-2.

El libro *Einstein* (de la colección *Grandes Pensadores* de Planeta-Agostini, 2008) tiene una contribución de José M. Sánchez Ron (*Vida y obra*) y otra de Luis Navarro Veguillas (*Los comienzos de la física cuántica*) así como diversos escritos de Einstein; en particular, incluye un largo extracto de *Mein Weltbild* (*Mi visión del mundo*) que recoge reflexiones de Einstein originalmente publicadas en 1934.

La interpretación de Copenhague y sus alternativas se discuten el S. Weinberg, *Lectures on Quantum Mechanics*, Cambridge Univ. Press (2013) en la Sec. 3.7; el entrelazamiento y las desigualdades de Bell se analizan en el Cap. 12. Los recientes experimentos sobre las desigualdades de Bell se comentan en A. Aspect, *Closing the door on Einstein and Bohr's debate*, *APS Physics* **8**, 123 (December 16, 2015).

Algún otro aspecto de la moderna mecánica cuántica se describe en mi artículo *Fotones, iones y gatos cuánticos*, *Revista Española de Física*, Abril-Junio 2014, págs.1-4, escrito con motivo de la visita de Serge Haroche a la *Real Sociedad Española de Física*; se puede encontrar también en <http://www.uv.es/~azcarrag/articulos.htm> .

Los amantes de la historia de la física cuántica podrán encontrar en la Sec. 7.1 extenso trabajo de G. Bacciagaluppi y A. Valentini, *Quantum Theory at the Crossroads: Reconsidering the 1927 Solvay Conference* (Cambridge Univ. Press, 2013; quant-ph/0609184), la crítica de Einstein a la *incompletitud* de la mecánica cuántica que ya planteó en esa conferencia, así como los *proceedings* y la transcripción de las discusiones que tuvieron lugar en esa famosa reunión (págs. 277-535). Los *proceedings* recogen, en particular, las contribuciones de Compton, de L. de Broglie, de Born y Heisenberg (conjunta) y de Schrödinger. El argumento de Einstein (más sencillo que el del artículo EPR de ocho años después) se recoge en la *General Discussion*, pág. 485.

²⁴ Tras la muerte de Einstein, sus documentos y cartas fueron recogidos por sus albaceas, su secretaria Helen Dukas y el Dr. Otto Nathan y, tras recorrer varios lugares, pasaron a la *Librería Judía de Jerusalén*. Hoy, La *Universidad Hebrea de Jerusalén* es la depositaria de la mayor parte del importante legado documental de Einstein. Durante algún tiempo, ese legado no fue accesible en su totalidad; el profesor emérito de esa universidad Hanoch Gutfreund, a cuyo cargo están los documentos de Einstein, me aseguró recientemente que ya no hay partes reservadas.