

## COLABORACIONES EN FÍSICA

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

Segunda parte (recibida el 18-feb-2016)

LA MECÁNICA CUÁNTICA Y EL REALISMO  
LOCAL DE EINSTEIN

Tras las secciones *La teoría de la Relatividad General de Einstein y Ondas gravitatorias y su detección por LIGO* de la primera parte de este artículo (ver 100cias@uned número 8, págs. 143-154, 2015), justificadas por la importancia de las noticias de esta última semana en la que las ondas gravitatorias y la Relatividad General (RG) han acaparado la atención, regresamos 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 Mecánica Cuántica (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.

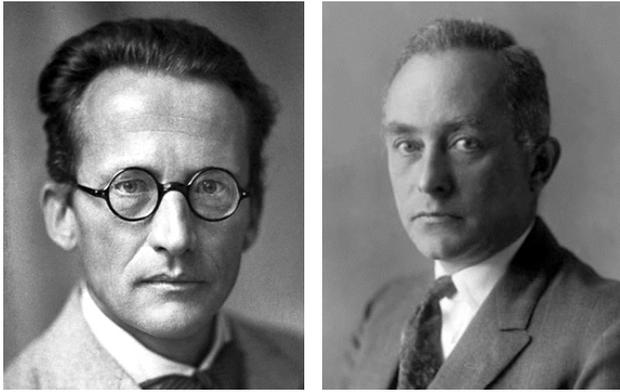
En cualquier caso, Einstein había manifestado ya abiertamente su decidido rechazo a la ortodoxia cuántica de Bohr y Heisenberg en el quinto congreso de Solvay de octubre de 1927. Ésta fue la gran conferencia sobre la MC (ver detalles en Referencias) que, con el título de *Electrones y Fotones* reunió a 29 participantes de los que



Los artífices de la Interpretación de Copenhague de la Mecánica Cuántica: Niels Henrik David Bohr (1885-1962, Nobel 1922) (izquierda) y Werner Karl Heisenberg (1901-1976, Nobel 1932, entregado en 1933) (derecha).

17 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!

El desagrado de Einstein surgía porque la MC presenta aspectos probabilísticos que se remontan a la interpretación de Born de la función de onda. 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*



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

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 Bohr<sup>1</sup> y Werner Heisenberg (y por Born), Einstein creía que la MC no proporcionaba una descrip-

<sup>1</sup> 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 austriaco 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'.

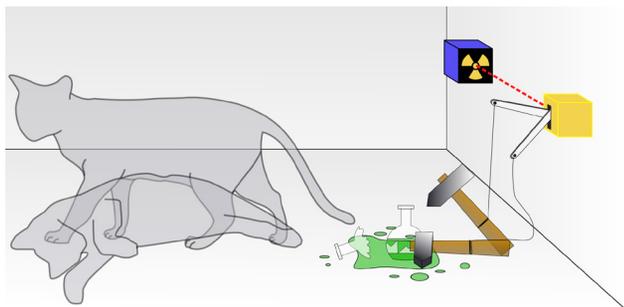
ción completa de la realidad física. Einstein no era el único disconforme con la visión dominante de la MC: en su día, también manifestaron su incomodidad o desacuerdo otros de sus nobelizados fundadores: Max Planck (1858-1947, Nobel 1918), Louis de Broglie (1892-1987, Nobel 1929) y Erwin Schrödinger (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 Hooft (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 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 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 ejem-



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).

plo, 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. Camb. 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 el físico John Archibald 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 10). En cualquier caso, Bohr no apreció en absoluto la visión de Everett cuando éste le visitó en Copenhague en 1959 (ni el ortodoxo Rosenfeld mencionado en la nota 1).

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 conjunto<sup>2</sup>. Una forma de evitar esta

<sup>2</sup> 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.

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 clásicos<sup>3</sup>. 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 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

<sup>3</sup> 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.



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

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 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 Neumann<sup>4</sup> 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

<sup>4</sup> *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).

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 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, *Vers-*

*chränkung*<sup>5</sup>). 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 km 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.

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

<sup>5</sup> 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*”.

para visiones antropomorfas<sup>6</sup>. 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.

En resumen: el realismo local de Einstein no es sostenible, el formalismo de la interpretación de Copenha-

<sup>6</sup> ¿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 sobre la pretendida naturaleza euclídea del espacio mencionado en la primera parte. 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*.



Juan Ignacio Cirac Sasaurain.

que 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 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 realis-

mo 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 entre-

lazados 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 6)– 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 'super-

determinismo', 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, si 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*<sup>7</sup>. Si a los experimentos mencionados sumamos la 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.

## 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

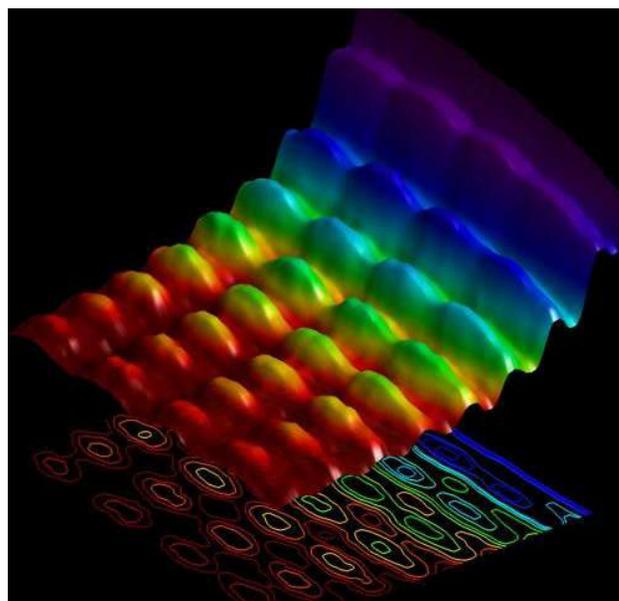
<sup>7</sup> La extraordinaria importancia de esta revolución, incluida la económica, puede apreciarse en el *Quantum Manifesto*, <http://querope.eu/manifesto>, cuyo objetivo es formular una estrategia común europea para que Europa se mantenga en la primera línea de la investigación y tecnologías cuánticas. El 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.

*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 decidida (nota 6).

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*<sup>8</sup>. Por el contrario, la relatividad *general* hubiera tar-

<sup>8</sup> 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.



La primera ‘foto’ de la luz mostrando su naturaleza dual como partícula y onda. Fuente: Fabrizio Carbone/EPFL.

dado mucho tiempo en aparecer de no haber existido Einstein. Sus aportaciones a la física cuántica fueron fundamentales en su creación<sup>9</sup> 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

<sup>9</sup> 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 1 y Referencias) para que el fotón quedara finalmente consagrado y aceptado.

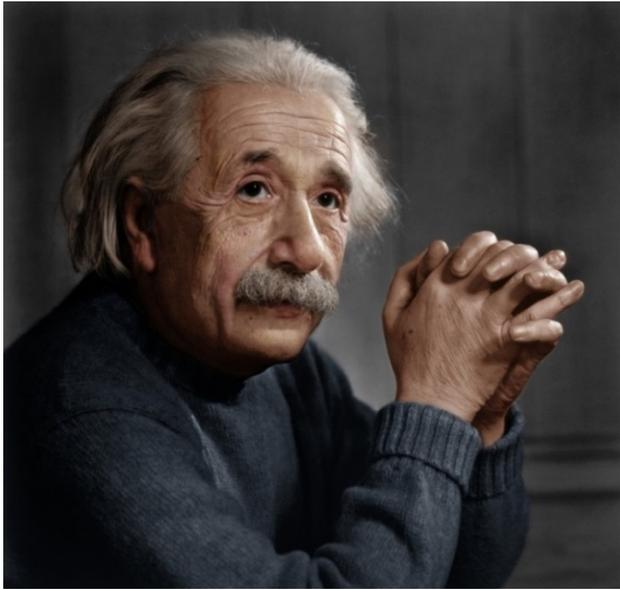
otro ejemplo –uno más– de cómo la ciencia pura genera automáticamente aplicaciones (ver nota 7). Einstein estableció esa hipótesis en *Zur Quantentheorie der Strahlung* (*Sobre la teoría cuántica de la radiación*, 1917) aunque, como saben los historiadores, la introdujo un año antes en una oscura revista 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 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 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  $^4\text{He}$ , cuyo núcleo es un bosón (el isótopo  $^3\text{He}$  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 pensamiento 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 periodo 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”.



Satyendra Nath Bose en 1925.



14-marzo-1879 18-abril-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 cosmológica<sup>10</sup> (que se discute en la primera parte), 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: mani-

<sup>10</sup>Como ya mencionamos en la primera parte de este artículo, 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.

pulación 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 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), <http://einsteinpapers.press.princeton.edu/>;
- CalTech: *The Einstein Papers Project*, <http://www.einstein.caltech.edu/>;
- Universidad Hebrea de Jerusalén: *Los archivos de Albert Einstein*<sup>11</sup>, <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 Nava-

<sup>11</sup>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.

rro 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 en S. Weinberg, *Lectures on Quantum Mechanics*, Cambridge Univ. Press (2013), 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 del 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.

J. Adolfo de Azcárraga  
Profesor emérito de la Universidad de Valencia  
y miembro del IFIC (CSIC-UV)  
<http://www.uv.es/~azcarrag/articulos.htm>