

## COMENTARIO INVITADO

# En torno a los Nobel de física de 2022

*Un Nobel tan tardío como merecido y que culmina un largo debate*

J. Adolfo de Azcárraga



John F. Clauser (1941- )

Alain Aspect (1947- )

Anton Zeilinger (1945- )

John F. Clauser (J.F. Clauser & Assoc., Walnut Creek CA, Estados Unidos), Alain Aspect (Univ. Paris-Saclay y École Polytechnique, Palaiseau, Francia) y Anton Zeilinger (Univ. de Viena, Austria)<sup>1</sup> han recibido, muy merecidamente y por tercios de diez millones de coronas suecas, el Premio Nobel de Física de 2022. El Comité Nobel se lo concedió el 4-X-2022 “por experimentos con fotones entrelazados, estableciendo la violación de las desigualdades de Bell y por iniciar la ciencia de la información cuántica”. Los tres habían recibido ya el Premio Wolf (por tercios de cien mil dólares) en 2010.

### Antecedentes: la ‘paradoja’ EPR

Las discusiones entre Albert Einstein y Niels Bohr sobre la Mecánica Cuántica (MC) se remontan en particular a la quinta (1927) y más famosa conferencia de Solvay, donde Einstein no consiguió vencer a Bohr, quien recurrió incluso a la relatividad general del propio Einstein para refutar sus críticas<sup>2</sup>. Einstein rechazaba la postura no realista de Bohr, llegándole a preguntar si creía que la Luna no existía cuando no se observaba. Max Jammer, en su clásico<sup>3</sup> *Conceptual Development*

*of Quantum Mechanics* (McGraw Hill NY 1966, Sec. 4.2), atribuye la postura no realista de Bohr a la influencia de filósofos como su compatriota S. Kierkegaard (1813-55), aunque sobre todo estuvo influido por el *pragmatismo* del estadounidense William James (1842-1910), a quien reconoció haber leído. Einstein, por su parte, acabó concediendo en Solvay que la MC era consistente, pero incompleta. Y, ocho años después, Albert Einstein, Boris Y. Podolsky y Nathan Rosen plantearon un *Gedankenexperiment*<sup>4</sup> en un artículo de cuatro páginas, sin referencias, para analizar la completitud de la descripción mecánico-cuántica de la realidad física [*Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?*, PR 47, 777-780 (1935)]. Este fundamental trabajo, en cuya redacción final parece que Podolsky tuvo una participación especial que no satisfizo del todo a Einstein (véase también A. Einstein, *Physics and reality*, J. Franklin Institute 221, 349-382 (1936)), constituye el origen del Nobel de física de 2022. EPR consideraban que, cuando “sin perturbar de ninguna forma un sistema, se puede predecir con certeza (*i.e.*, con probabilidad uno) el valor de una magnitud física, entonces existe un

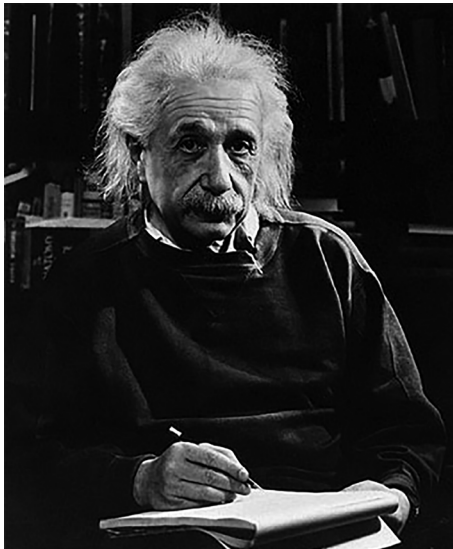
<sup>1</sup> El lector habrá apreciado que este artículo no se inicia con las penosas caricaturas de la Fundación Nobel que luego se reproducen gregariamente. Las fotos reflejan mucho mejor a los premiados, incluyendo *la moustache* de Aspect que seguro elogiaría Guy de Maupassant.

Las referencias incluyen los títulos para indicar su contenido. Phys. Rev. = PR; Phys. Rev. Lett. = PRL.

<sup>2</sup> Los *Proceedings* de Solvay han sido publicados por la CUP, editados por G. Bacciagaluppi y A. Valentini, *Quantum Theory at the Crossroads: Reconsidering the 1927 Solvay Conference*. Son también accesibles en arXiv:quant-ph/0609184 (v2: 24-X-2009). Bohr ha dado cuenta de sus discusiones con Einstein en *Atomic physics and human knowledge*, 1958 (Dover, 2010).

<sup>3</sup> El estudio histórico más completo es el de J. Mehra y H. Rechenberg, *The Historical Development of Quantum Theory* (6 volúmenes entre 1982 y 2001 con el 1,5,6 y dobles; 9 tomos en total, J. Springer).

<sup>4</sup> El asunto fue retomado muy poco después por W. Furry, *Note on the Quantum-Mechanical Theory of Measurement* [PR 49, 393-399, 476 (1936)]



A. Einstein (1879-1955)



B. Y. Podolsky (1896-1966)



N. Rosen (1909-95)

*elemento de realidad* que corresponde a esa magnitud física". EPR establecían entonces la "*condición de completitud*: todo elemento de realidad debe tener su contrapartida en una teoría física". Sin embargo, según la MC, "en el caso de dos magnitudes descritas por dos operadores que no conmutan, el conocimiento de una impide el conocimiento de la otra. Por ello, o bien 1) la descripción de la realidad que proporciona la función de onda en la MC no es completa o 2) esas dos magnitudes no pueden tener una realidad simultánea".

En su 'experimento mental', Albert Einstein y sus colegas más jóvenes cuestionaban la visión estándar de la Mecánica Cuántica (MC) de Bohr y Werner Heisenberg, la interpretación de Copenhague. En efecto, de acuerdo con la MC, cuando se

efectúan medidas sobre dos sistemas separados que previamente han interactuado entre sí, se encuentran correlaciones entre ellas aunque la separación de los dos sistemas en el momento de las medidas no permita que se coordinen para generarlas. Por ejemplo, si dos partículas de  $s=1/2$  en un singlete se separan tras interactuar de forma que ya no puedan hacerlo y se mide el espín de la primera en una dirección, se concluye que esa misma componente del espín para la segunda partícula debe tener un valor definido y opuesto al obtenido en la primera. Más aún: de acuerdo con la MC, se puede decidir mientras se separan las partículas —antes de la medida— la dirección en la que se medirá el espín de la primera y que implicará un valor opuesto para la segunda en esa misma dirección por muy lejana que esté. EPR juzgaban este hecho —la *spooky action at a distance* (*spukhafte Fernwirkung*) en palabras de Einstein— insostenible, concluyendo que "la descripción de la realidad tal como la proporciona la función de onda no es completa" en contra de la MC, que supone que  $\psi$  caracteriza completamente un estado. Estas correlaciones cuánticas son distintas de las que se pueden observar clásicamente: la observación del factor  $Rh$  de uno de dos gemelos univitelinos permite conocer el del otro. Pero aquí, aunque la 'medida' del primero da información precisa sobre el segundo, no influye sobre éste; ambos gemelos poseían el mismo  $Rh$  antes y después de la medida y no hay ajuste ni elección posible. En su 'testamento científico' [P.A. Schilpp Ed., *A. Einstein, Philosopher Scientist*, Library of Living Philosophers, Evanston, Illinois, vol. II *Reply to criticisms*, pág. 681 (1949)] Einstein se refirió al *Gedankenexperiment* como "la paradoja EPR", aunque en realidad expresa una *contradicción* entre las premisas de EPR y la MC. Por supuesto, EPR aceptaban que "no se llegaría a esa [nuestra] conclusión si se insistiera en que dos o más magnitudes físicas pueden ser elementos simultáneos de realidad *sólo cuando pueden ser*



Niels Bohr (1885-1962)

*medidos o predichos simultáneamente*” (sus cursivas). Por otra parte, EPR no negaban que una descripción completa pudiera existir; de hecho, creían “que tal teoría era posible”.

Bohr reaccionó al ataque frontal de EPR en sólo dos meses, con un artículo de idéntico título [N.B., PR 48, 696-702 (1935)] y sólo dos citas: a EPR y a sí mismo. Bohr argumentaba que el análisis de EPR contiene una ambigüedad esencial cuando se aplica a fenómenos cuánticos el citado requerimiento de “no perturbar el sistema de ninguna forma” al hablar de “realidad”. Bohr concluye que no hay contradicción con la hipótesis de completitud si se reconoce que la MC sólo se ocupa de la interacción de los microsistemas con el aparato de medida y no de su carácter intrínseco, explicando en ese contexto que a partir del punto de vista de “complementariedad” la descripción mecánico-cuántica satisface todas las exigencias racionales de completitud. Dentro del *Kopenhagener Geist der Quantentheorie*, como lo llamaba Heisenberg, hay una distinción profunda entre la descripción de los fenómenos microscópicos que da la MC y los detectores macroscópicos que los estudian y que se suponen sometidos a las leyes de la física clásica. Bohr cuestionaba así el análisis de EPR y su *realismo local* que supone que, a la vez, a) las propiedades físicas de los objetos son definidas y existen independientemente de que se observen o no (*realismo*: existe una realidad física independiente de la teoría) y b) que las influencias físicas no pueden propagarse a una velocidad superior a la de la luz (*localidad*). Einstein y sus colegas argumentaban que, si uno se atiene a los detalles del cálculo cuántico, se encuentra que el resultado de la medida sobre una partícula que antes ha interactuado con otra afecta instantáneamente una medida sobre esta última pese a no poder tener comunicación con la primera, ‘acción a distancia’ inaceptable. Como Einstein escribió después [P.A. Schilpp Ed., *loc. cit.* vol. I, pág. 85 (1949)], “en mi opinión, hay una hipótesis que debería ser irrenunciable: la situación de un sistema  $S_2$  es independiente de lo que se haga con el sistema  $S_1$  espacialmente separado del primero”. Así pues, como una posible influencia no puede viajar a más velocidad que la luz, debía admitirse que cada partícula poseía, antes de la medida, la propiedad que revelaba esa medida. En consecuencia, Einstein concluía que la descripción cuántica no era *completa*.

Aunque EPR *no* las mencionaban en su artículo, cabía pensar en la existencia de un conjunto de *variables ocultas*, desconocidas, que completarían la descripción mecánico-cuántica del sistema y que explicarían su comportamiento evitando la ‘fantasmal acción a distancia’ de Einstein. La especificación de esas variables suplementarias predeeterminaría la observación de cualquier observable y, de esta forma, las predicciones de la MC serían consecuencia de las distribuciones estadísticas de



Werner Heisenberg  
(1905-76)



John von Neumann  
(1903-57)

esas variables *ocultas*, reflejo de nuestra ignorancia. Sin embargo, para complicar más las cosas y tres años antes del artículo de EPR, el genio polifacético John (János) von Neumann había publicado su *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*<sup>5</sup> (J. Springer, 1932). En él, von Neumann formulaba la MC axiomáticamente en términos de operadores y de los espacios de Hilbert por él mismo introducidos (cap. II) y mostraba la dificultad de completar

<sup>5</sup> La traducción española de Ramón Ortiz Fornaguera, *Fundamentos matemáticos de la Mecánica Cuántica*, la publicó el Inst. de Matemáticas Jorge Juan del CSIC en 1947, mucho antes que la inglesa de Princeton Univ. Press de 1955 que fue la que leyó Bell pues, según escribió, no sabía alemán. El CSIC ha publicado recientemente una muy cuidada edición (2018) a cargo de J.M. Sánchez Ron.

Erwin Schrödinger  
(1887-1961)

la MC con ‘variables ocultas’, que determinarían el comportamiento preciso de un sistema físico más allá de las probabilidades que permite la función de onda que lo caracteriza completamente.

Por su parte, Erwin Schrödinger era asimismo muy consciente de las peculiaridades de la MC, que no le entusiasmaba pese a ser uno de sus creadores. Refiriéndose al colapso de la función de onda<sup>6</sup> llegó a decir: “si tenemos que aguantarnos con esos condenados saltos cuánticos, entonces lamento haber tenido algo que ver” [E.S., Brit. J. Phil. Sci. **3**, 109-23,233-47 (1952)]. Schrödinger, también en 1935, había caracterizado la relación entre dos sistemas que previamente han interactuado entre sí como *entrelazamiento (Verschränkung) cuántico* [E.S., *Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik (The present situation in quantum mechanics)*, Die Naturwissenschaften **23**, 807-12, 823-28 y 844-49 (1935)]. En su *Discussion of Probability Relations between Separated Systems* [E.S., Math. Proc. Cam. Phil. Soc. **31**, 555-563 (1935)] Schrödinger escribió, en clara reacción a EPR, que “cuando dos sistemas, cuyos estados conocemos por sus respectivos representantes, entran en interacción debido a fuerzas conocidas entre ellos y tras un cierto tiempo de influencia mutua se separan de nuevo, ya no pueden ser descritos como antes, es decir, dotando a cada uno de una representación propia”. Y añadió: “yo no me referiría a este hecho como un aspecto, sino como *la* propiedad característica de la MC,

<sup>6</sup> Una alternativa al colapso es la “many worlds interpretation of QM”, la MWI de Hugh Everett III [H.E., “Relative State” Formulation of Quantum Mechanics, Rev. Mod. Phys. **29**, 454-462 (1957)], que no se considerará aquí.

aquella que la separa de las líneas clásicas del razonamiento. Como consecuencia de la interacción, los dos representantes (o funciones  $\psi$ ) han quedado entrelazadas”. De otro modo, las propiedades de una pareja de partículas entrelazadas no se reducen a propiedades independientes de cada una de ellas por muy alejadas que estén. La función de onda de un estado entrelazado no es separable (no es producto de componentes): el entrelazamiento es una propiedad global. Schrödinger consideró también las consecuencias paradójicas del entrelazamiento en el caso de un sistema microscópico y de uno macroscópico por medio de su famoso gato<sup>7</sup>. El análisis del entrelazamiento y sus consecuencias constituye la base de los trabajos de los tres premiados, donde aquél adquirirá aspectos nuevos no previstos por Schrödinger.

### John Stewart Bell: MC vs realismo local

J.S. Bell, físico de partículas del CERN nacido en Belfast con ascendencia escocesa, ha jugado un papel esencial en todo lo que sigue. De hecho, su impacto en la comprensión y fundamentación de la MC ha sido extraordinario<sup>8</sup>; desgraciadamente falleció en Ginebra en 1990 sin haber recibido su propio y merecido Nobel. Según Bell, “la paradoja EPR se propuso como un argumento para mostrar que la MC no podía ser una teoría completa y que debía suplementarse con variables adicionales que restaurarían la causalidad y localidad de la teoría”. Así pues, la cuestión planteada por EPR podía resumirse así: ¿puede explicarse el carácter probabilista de las predicciones de la MC por medio de una descripción suplementaria subyacente proporcionada por variables ocultas y por tanto no observables? Durante muchos años, la polémica entre Einstein y Bohr había permanecido ajena a la ‘física real’; el problema parecía reducirse a aspectos epistemológicos de la MC y a la interpretación de su formalismo que, como diría el propio Bell, era válido FAPP (*for all practical purposes*). Sin embargo, esta situación cambió radicalmente cuando Bell publicó un breve y fundamental artículo escrito durante una estancia en la Univ. de Brandeis, *On the Einstein Podolsky Rosen Paradox*, inaugurando una efímera revista [Physics **1**, 195-200 (1964)]. Bell señalaba en ese trabajo que las hipótesis del llamado ‘teorema’ de von Neumann<sup>9</sup> (que después calificaría como “silly”) contra

<sup>7</sup> Véase e.g., *Fotones, iones y gatos cuánticos: sobre la visita del Nobel Serge Haroche a la RSEF*, Rev. Esp. Fís. **28**, 2 p. 1-4 (2014); también en <http://www.j.a.de.azcarraga.es>, Artículos Grales. n.º 38.

<sup>8</sup> Los artículos de Bell sobre su ‘filosofía cuántica’ están recogidos en un libro de título bien expresivo: J.S. Bell, *Speakable and unspeakable in quantum mechanics*, CUP (1987).

<sup>9</sup> En esa época, e incluso años después, no abundaban textos de MC con alguna discusión sobre la completitud de la MC, las ‘variables ocultas’ o la conclusión de von Neumann que supuestamente las prohibía. Una excepción fue el libro de Bohm (*Quantum Theory*, 1951) que en su Sec. 22.19 concluía

las variables ocultas no eran físicamente sostenibles, remitiéndose a un análisis ya realizado pero que apareció después, *On the Problem of Hidden Variables in Quantum Mechanics* [Rev. Mod. Phys. **38**, 447-52 (1966)], en el que mostraba (Sec. III) lo inadecuado de una afirmación de von Neumann relativa a los autovalores de una suma de operadores hermíticos cuando éstos no conmutan; Clauser criticó también el ‘teorema’ de von Neumann en su *Von Neumann’s Informal Hidden Variable Argument* [Am. J. Phys. **39**, 1095-96 (1971)]. De hecho, David Bohm ya había señalado que las ideas de von Neumann sobre la inconsistencia de la MC con variables ocultas no afectaban a su propia interpretación de la MC que las incluía, contraejemplo que según von Neumann no podría existir<sup>10</sup> [D.B., *A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of “Hidden” Variables I, II*, PR **85**, (I) 166-179, (II) 180-193 (1952)]. Bohm “intentaba encontrar alguna otra interpretación de la teoría cuántica en términos de esas variables ‘ocultas’ que en principio determinan el comportamiento preciso de un sistema individual, pero que en la práctica son promediadas en las medidas que se pueden efectuar”. En sus dos artículos, Bohm sugería “una interpretación de la teoría cuántica precisamente en términos de esas variables ocultas” [...] que “conduce exactamente a los mismos resultados para todos los procesos físicos que la interpretación usual” (vid. I, Sec. 3). Pero además, Bohm y su estudiante Yakir Aharonov (1932-) consideraron después, en un importante trabajo de 1957, la posibilidad de resolver empíricamente la cuestión de si los aspectos cuánticos discutidos por EPR representaban propiedades reales de la materia, concluyendo que para ese fin lo más práctico sería considerar parejas de fotones<sup>11</sup> [D.B. y Y.A., *Discussion of Experimental Proof for the Paradox of Einstein, Rosen, and Podolsky*, PR **108**, 1070-76 (1957)]. Aunque en su trabajo reconocían que tal experimento estaba por hacer, el análisis de una antigua experiencia con fotones producidos en la aniquilación  $e^+e^-$  que podían usarse como ejemplo de una configuración EPR [C.S. Wu and I. Shakhov,



David J. Bohm  
(1917-92)

*The Angular Correlation of Scattered Annihilation Radiation*, Phys. Rev. **77**, 136 (1950)], les llevó a concluir que había acuerdo con la MC y sus correlaciones distantes pero no con hipótesis que implicaran una ruptura de la MC que evitase la paradoja EPR. No obstante, el análisis de la polarización de los fotones de la aniquilación del positronio era poco concluyente.

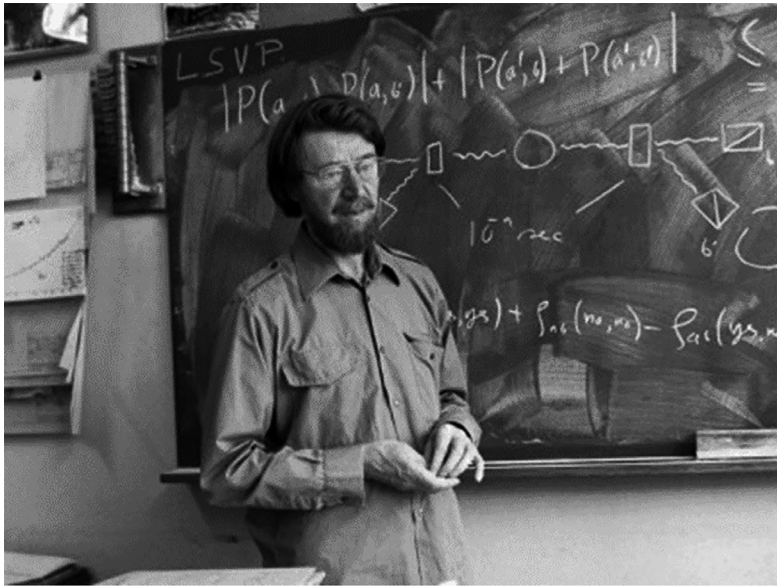
Pero en el citado trabajo de 1964, Bell probó además un importantísimo resultado. Tras considerar el análisis de Bohm y Aharonov de la paradoja EPR, utilizando partículas de espín  $\frac{1}{2}$  y bajo la hipótesis de localidad, Bell mostró la existencia de una *desigualdad* que ninguna teoría de variables ocultas local podría satisfacer *para cualquier resultado de la MC*, trasladando así la discusión sobre sus fundamentos al dominio experimental. En efecto, si las influencias físicas no pueden viajar a velocidad superior a la de la luz (*localidad*) y los objetos poseen propiedades físicas independientes de la medida (*realismo*), entonces las correlaciones entre ciertas medidas de partículas entrelazadas y por dos observadores distantes debían violar las *desigualdades de Bell*<sup>12</sup>: el realismo local einsteiniano y las predicciones de la MC serían *experimentalmente* incompatibles. Bell concluía su artículo de *Physics* diciendo que “en una teoría en la que se añaden parámetros a la MC para determinar los resultados de medidas individuales, sin cambiar las predicciones estadísticas, debe existir un mecanismo por el que la configuración de un aparato de medida puede influenciar la lectura de otro instrumento por lejano que esté. Más aún, la señal implicada debe propagarse instantáneamente, de forma que la teoría no podría ser invariante Lorentz”. Y añadía: “por supuesto, la situación es diferente si las predicciones mecánico-cuánticas tienen una

(en contraste, sin embargo, con sus artículos de 1952 citados en el texto) que “no theory of mechanically determined hidden variables can lead to all of the results of the quantum theory”.

Más tarde, en España, la notable excepción sería la *Mecánica Cuántica* de A. Galindo y P. Pascual (1ª ed. Alfaguara, 1978), que incluía un apéndice con una discusión sobre variables ocultas.  
<sup>10</sup> Tampoco la de Louis de Broglie con su onda piloto (‘guía’), que cabía considerar también como una teoría de variables ocultas [L. de B., *La mécanique ondulatoire et la structure atomique de la matière et du rayonnement*, J. Phys. Radium **8**, 225-241 (1927); Proc. de Solvay (nota 2) y *Tentative d’Interprétation Causale et Non-Linéaire de la Mécanique Ondulatoire*, Gautier-Villars (1956)].

<sup>11</sup> EPR utilizaron medidas de la posición y del momento para ilustrar su paradoja. La propuesta de usar sistemas compuestos de partículas con espín (electrones y más prácticamente fotones) en el contexto de EPR, como se haría después en los experimentos, se debe a Bohm y a Aharonov.

<sup>12</sup> Es común hablar genéricamente de ‘desigualdades’ para referirse a alguna de las versiones de la desigualdad de Bell.



John Stewart Bell (1928-1990). En la pizarra, aspectos de su desigualdad y de un experimento.

validez limitada. Sería concebible que correspondieran sólo a experimentos en los que los ajustes de los instrumentos son establecidos con antelación suficiente para permitirles alcanzar alguna relación mutua intercambiando señales con velocidad inferior o igual a la de la luz. *A este respecto [hacer] experimentos del tipo propuesto por Bohm y Aharonov (referencia anterior) en los que los controles se cambian durante el movimiento [flight] de las partículas es crucial* (mis cursivas). Resulta curioso recordar que la intención de Bell era reivindicar a Einstein, pues creía que “la superioridad intelectual de Einstein sobre Bohr era enorme: una vasta separación entre quien veía claramente lo que era necesario [Einstein] y el oscurantista [Bohr]”. De hecho, Bell se refería al principio de complementariedad de Bohr como principio de “contradictoriedad”. En cualquier caso, era esencial someter a la experimentación las desigualdades de Bell para ver si el realismo local de Einstein era o no sostenible.

### Los experimentos de los premios Nobel

En este punto intervienen ya los tres galardonados, Clauser en primer lugar. Hay que resaltar la curiosidad y también el coraje de los pioneros; en aquellos años la investigación sobre la fundamentación de la MC no estaba demasiado bien vista<sup>13</sup> y no era considerada ‘verdadera física’. El propio Bell era más conocido por sus contribuciones a la física de partículas (e.g. Roman Jackiw colaboró con Bell sobre la ‘anomalía axial (1969) de Adler-Bell-Jackiw’) y hasta sobre aceleradores cuando él mismo se juzgaba ‘ingeniero cuántico’ [M. Bell, *John Bell and accelerator physics*, Europhys. News **22** #4, 72 (1991)], que por su fundamental teorema; Clauser ha comentado que Bell procuraba que su trabajo sobre la MC

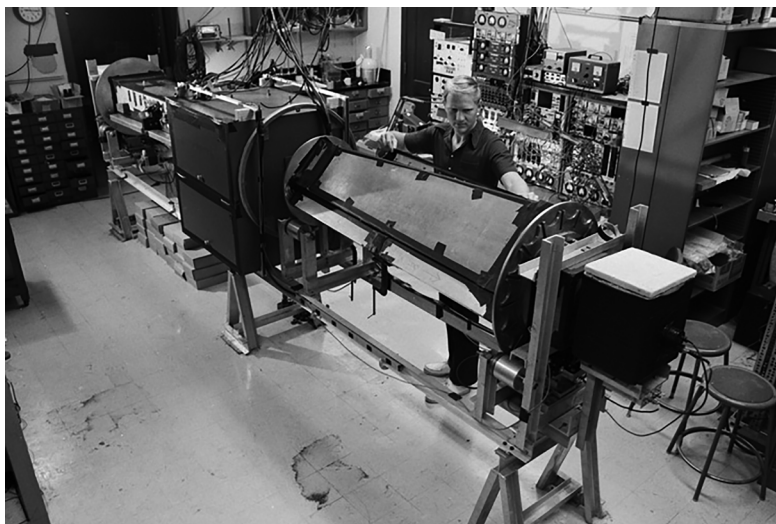
<sup>13</sup> Según me comentó, tras leer el artículo de Bell y decidir que quería trabajar en ese campo, Aspect fue a visitarlo al CERN. Lo primero que le preguntó Bell fue: ¿tiene ya plaza permanente?

no ocupara su tiempo en la *Th. Div.* del CERN. No obstante, cuando Clauser le preguntó, Bell le alentó a analizar la cuestión experimentalmente pues “siempre hay una ligera posibilidad de obtener un resultado inesperado, que sacudiría el mundo”. En una reunión de la APS Clauser propuso realizar un experimento [Bull. Am. Phys. Soc. **14**, 578 (1969)]; como consecuencia, M.H. Horne, A. Shimony, y R.A. Holt entraron en contacto con él y los cuatro decidieron publicar conjuntamente una modificación de la desigualdad de Bell original que fuera ya adecuada para su comprobación experimental, proponiendo además utilizar parejas de fotones entrelazados [J.F.C., M.A.H., A.S. y R.A.H., *Proposed experiment to test local hidden-variable theories*, PRL **23**, 880-884 (1970)]. La desigualdad CHSH establece que una magnitud  $S$  (por suma), formada a partir de sumas de correlaciones EPR para un conjunto de posibles orientaciones de los polarizadores, debe satisfacer  $-2 \leq S_{\text{CHSH}} \leq 2$ ; la desigualdad simplemente supone que los resultados locales existen, con independencia de que se midan o no. Para la MC, sin embargo, hay orientaciones para las que  $|S_{\text{MC}}| > 2$ . De hecho, en el caso de espín  $\frac{1}{2}$  y para analizadores en las direcciones  $a, a', b, b'$  espaciadas en ángulos  $\pi/4$  se tiene  $|S(a, a', b, b')_{\text{MC}}| = 2\sqrt{2} \cdot C$  con  $C \leq 1$  ( $C=1$  para una experiencia ideal con analizadores perfectos y sin pérdidas). Había, por tanto, que decidir experimentalmente.

Los primeros experimentos fueron realizados por S.J. Freedman (1944-2012) y el propio Clauser [S.J.F. y J.F.C., *Experimental Test of Local Hidden-Variable Theories*, PRL **28**, 938-941 (1972)] midiendo la correlación de las polarizaciones de parejas de fotones emitidos en la desexcitación del calcio ( $^{40}\text{Ca}$ ) que, por tener un origen común, están entrelazados; cada uno de los dos detectores estaba provisto de un polarizador orientable. El experimento mostró que las restricciones CHSH impuestas por la existencia de variables ocultas a las correlaciones eran violadas “con una elevada precisión estadística, proporcionando una fuerte evidencia contra las teorías de variables ocultas” y en favor de la MC. Después, otros análisis y experimentos de J.F. Clauser y M.A. Horne [*Experimental consequences of objective local theories*, PR **D10**, 526-535 (1974)], de J.F. Clauser [*Experimental Investigation of a Polarization Correlation Anomaly*, PRL **36**, 1223-1226 (1976)], así como de E. S. Fry y R. C. Thompson [*Experimental Test of Local Hidden-Variable Theories*, PRL **37**, 465-468 (1976)], confirmaron la violación de las desigualdades de Bell y la validez de la MC [véase también J.F. Clauser y A. Shimony, *Bell's theorem. Experimental tests and implications*, Rep. Progr. Phys. **41**, 1881-1927 (1978)].

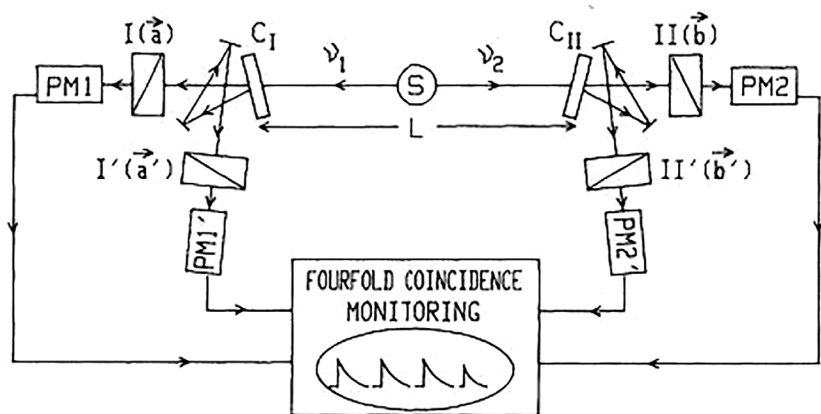
Para entonces A. Aspect, junto con sus colaboradores del *Institut d'Optique Théorique et Appliquée* de Orsay, realizó nuevas comprobaciones de las desigualdades también con parejas de fotones procedentes de la desexcitación del calcio [A. Aspect,

P. Grangier y G. Roger, *Experimental Tests of Realistic Local Theories via Bell's Theorem*, PRL **47**, 460-463 (1981); A.A., P.G. y G.R., *Experimental Realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment: A New Violation of Bell's Inequalities*, PRL **49**, 91-94 (1982)]. Los resultados ( $S_{\text{exp}}=2.697\pm 0.015$ ), estuvieron en excelente acuerdo con las predicciones de la MC ( $S_{\text{MC}}=2.70\pm 0.05$ ) violando fuertemente la desigualdad CHSH y excluyendo las teorías basadas en el realismo local einsteiniano. Sin embargo, estos experimentos presentaban todavía una vía de escape<sup>14</sup> o hueco sin cerrar: el *locality loophole* ya señalado por Bell en su comentario reproducido antes en cursivas que no los hacía concluyentes del todo. El propio Aspect había presentado en 1975 y en dos trabajos como autor único una propuesta para conseguir un cambio rápido, al azar, en los ajustes de los polarizadores *mientras los fotones estaban todavía en vuelo* desde la fuente a los detectores, evitando así una posible 'coordinación' entre los detectores situados a ambos lados del experimento que, por alguna y desconocida interacción, pudieran 'conspirar' alterando el resultado [A.A., *Proposed experiment to test separable hidden-variable theories*, Phys. Lett. **54A**, 117-118 (1975); *Proposed experiment to test the nonseparability of quantum mechanics*, PR **D14**, 1944-1951 (1976)]. Aspect y su equipo realizaron por primera vez esa experiencia *à la Bohm* y Aharonov utilizando polarizadores variables y no estáticos como hasta entonces. Para evitar el problema insoluble de cambiar el ajuste de los polarizadores en nanosegundos debido a su



Clauser y su experimento. Foto: S. Gerber-Berkeley Lab.

tenía lugar cada 10 nanosegundos, de modo que la orientación de los polarizadores se modificaba más rápidamente que el tiempo de propagación de la luz entre los dos extremos,  $L/c=12\text{m}/c=40\text{ns}$ . De esta forma, quedaba garantizada la localidad/causalidad einsteiniana requerida por las desigualdades de Bell al estar la detección en un extremo y el cambio de orientación del polarizador en el otro separados por un intervalo de tipo espacial, imposibilitando así una potencial influencia mutua. Los resultados de este *experimentum crucis* [A. Aspect, J. Dalibard y Gérard Roger, *Experimental test of Bell's inequalities using time-varying analyzers*, PRL **49**, 1804-1807 (1982)] estuvieron de acuerdo con las predicciones de la MC y violaron las desigualdades



Experimento de Aspect et al. (1982). (PM1,PM1') y (PM2,PM2') parejas de detectores; I(a),I'(a') y II(b),II'(b') parejas de polarizadores en dos direcciones (a,a') y (b,b') en cada lado; C<sub>I</sub> y C<sub>II</sub> conmutadores ópticos; en el centro, la fuente S (source) de fotones.

peso, Aspect reemplazó *cada* polarizador (a unos 6m a cada lado de la fuente de calcio de fotones) por *dos* de ellos a diferentes ángulos precedidos de un veloz conmutador óptico capaz de dirigir al azar el fotón incidente a uno o al otro; cada combinación equivalía a un único polarizador cambiando rápidamente entre dos orientaciones. La conmutación

de Bell en 5 desviaciones estándar. Pese a todo, aún cabía considerar la separación insuficiente, por lo que quince años después y en el espíritu de Aspect, G. Weihs, A. Zeilinger y colaboradores retomaron el problema reforzando la localidad con una mayor separación de los detectores (400m) y confirmando la violación de la desigualdad CHSH en 30 desviaciones estándar [G. Weihs et al., *Violation of Bell's Inequality under Strict Einstein Locality Conditions*, PRL **81**, 5039-43 (1998)]<sup>15</sup>.

<sup>14</sup> Ninguna experiencia es en la práctica 100% *loophole free*. Lo ideal es que los diferentes 'huecos' puedan ser descartados con la mayor precisión y en el mismo experimento, como será el caso. Véase J.-Å. Larsson, *Loopholes in Bell inequality tests of local realism*, J. Phys. **A47**, 424003-1-33 (2014).

<sup>15</sup> Nótese, sin embargo, que la existencia de esas correlaciones cuánticas no implica que puedan usarse para transferir

Así pues, mucho después de fallecer sus protagonistas y tras los experimentos de Aspect de 1982 y de Zeilinger en 1998, la antigua disputa entre Bohr y Einstein parecía zanjada en contra de Einstein: la postura de Bohr era la más razonable. De hecho Aspect, tras su famoso experimento, redirigió su atención a otros intereses donde también diseñó y llevó a cabo experiencias importantes, relacionadas con el enfriamiento de átomos con láser (con Claude Cohen-Tannoudji), el uso de condensados de Bose Einstein en óptica cuántica, la localización de Anderson, etc. Pese a todo, los partidarios del realismo local señalaban que aún se debía considerar —y cerrar— una posible vía de escape adicional, el *detection loophole* (o *fair sampling loophole*). Se podía argüir que era posible que los detectores de los experimentos realizados no observasen una fracción sustancial de los fotones (ninguno tiene un 100% de eficiencia), de forma que las desigualdades de Bell podrían preservarse con una detección que tuviera menos pérdidas. Finalmente, en 2015, se realizaron varias experiencias que podían ser ya consideradas ‘completas’: B. Hensen *et al.*, *Experimental loophole-free violation of a Bell inequality using entangled electron spins separated by 1.3 km* [Nature **526**, 682-685 (2015)], la del grupo de A. Zeilinger [M. Giustina *et al.*, *Significant-Loophole-Free Test of Bell's Theorem with Entangled Photons*, PRL **115**, 250401-1-7 (2015)] y la de L.K. Shalm *et al.*, *Strong Loophole-Free Test of Local Realism* [PRL **115**, 250402-1-10 (2015)]. Así pues, aunque las experiencias previas tenían huecos, estos tres experimentos<sup>16</sup> los cerraban y simultáneamente. Por ejemplo, la probabilidad puramente estadística de que los resultados se produjeran bajo el realismo local en el experimento de Zeilinger *et al.* no superaba un  $10^{-31}$  (que corresponde a 11.5 desviaciones estándar). Las tres experiencias mencionadas, la primera con electrones y las otras dos con fotones podían, final y muy razonablemente, considerarse ya *loophole-free*.

### Lo conseguido y más allá

De acuerdo con teorema de Bell, y como se ha comprobado experimentalmente, no existe una teoría local con parámetros adicionales que reproduzca las predicciones cuánticas para las correlaciones de tipo EPR: *si una teoría de variables ocultas es*

información entre dos observadores a mayor velocidad que la de la luz. Si por ejemplo consideramos las medidas de espín que ya hemos mencionado y ambos observadores decidieran medir  $s_z$ , no podrían comprobar que obtienen resultados opuestos pues ninguno de ellos puede transferir información superlumínica sobre los datos recogidos. Ambos observadores necesitarían ‘reunirse’ para comparar sus resultados y concluir *entonces* que existen las correlaciones observadas.

<sup>16</sup> Estos tres importantes trabajos incluyen entre sus autores a C. Abellán, W. Amaya, V. Pruneri y M.W. Mitchell del Institut de Ciències Fotòniques (ICFO) de Barcelona en Castelldefels, que dirige el miembro de la RSEF Lluís Torner.

*local estará en desacuerdo con la MC y si está de acuerdo con la MC no será local* [J. Bell, *Locality and Quantum Mechanics: reply to Critics*, CERN TH-2100, 14-XI-1975; Epistemol. Lett. 2-4 (Nov. 1975)]. La experimentación está de acuerdo con la MC y contra el realismo local<sup>17</sup>.

Es posible que la cautela del Comité Nobel en conceder el premio se haya debido a la trascendencia de sancionar el debate físico-filosófico entre Einstein y Bohr hasta que estuvieran fuera de duda los resultados de los premiados:

- John F. Clauser fue el principal autor que propuso verificar por primera vez las desigualdades de Bell con fotones entrelazados y quien llevó a cabo el primer experimento en 1972. Quizá influyó también en la tardanza del premio que Clauser había abandonado la investigación académica para dedicarse a su compañía de imagen médica (en Google Scholar Clauser aparece como “theoretical and experimental physicist (retired)”). Recuerdo que cuando en 2019 entré en contacto con él para proponerlo junto con Aspect y Zeilinger a los premios *Fronteras del Conocimiento* de ese año (sin éxito), mostró su sorpresa manifestando que estaba apartado y dedicado a su compañía. Sin embargo, su trabajo pionero, tanto teórico como experimental, fue muy importante para lo que vino después.
- Alain Aspect propuso en 1975 y realizó en 1982 el primer experimento en el que los polarizadores eran cambiados durante el viaje de los fotones, analizando el conflicto frontal entre la MC y la visión de Einstein basada en el realismo local. Pero, además, Aspect jugó un papel esencial convenciendo a muchos ‘*mainstream physicists*’ del extraordinario interés de zanjar el debate Einstein-Bohr. En opinión de O. Freire [*Philosophy enters the optics laboratory: Bell's theorem and its first experimental tests* (1965-1982), *Studies in History and Philosophy of Mod. Phys.* **37**, 577-616 (2006)], “quienes asistían a las charlas de Aspect lo consideraban un conferenciante carismático”, como muchos pudimos apreciar en Valencia a principios de los noventa y también cuando visitó la RSEF e impartió el

<sup>17</sup> También se han realizado experimentos para descartar las variables ocultas del teorema de Kochen-Specker [S.K. y E.P.S., *The Problem of Hidden Variables in Quantum Mechanics*, J. Math. and Mech. **17**, 58-87 (1967)], llamado de Bell-KS por D. Mermin por su relación con el trabajo de Bell de 1966 [D. M., *Hidden variables and the two theorems of John Bell*, Rev. Mod. Phys. **65**, 803-814 (1993) y correcciones posteriores de erratas]. Así, el experimento de Y.-F. Huang *et al.* [*Experimental Test of the Kochen-Specker Theorem with Single Photons*, PRL **90**, 250401-1-4 (2003)] ha mostrado completo acuerdo con la MC. Esa experiencia se basa en una propuesta [C. Simon, M. Zukowski, H. Weinfurter y A. Zeilinger, *Feasible “Kochen-Specker” Experiment with Single Particles*, PRL **85**, 1783-7856 (2000)] que parte de ideas de A. Cabello y G. García-Alcaine [*Proposed experimental tests of the Bell-Kochen-Specker theorem*, PRL **80**, 1797-1799 (1998)].



26-I-2017 en el Aula Blas Cabrera de la UCM la conferencia “*From the Einstein-Bohr debate to quantum information: a new quantum revolution*”. No hay duda de que Aspect contribuyó de forma especial a la difusión de la importancia de las nuevas tecnologías.

- Por su parte, Anton Zeilinger, tras realizar con su grupo en 1998 la versión más precisa del experimento de Aspect, efectuó en 2015 uno de los *loophole free tests* de las desigualdades de Bell. Más aún, Zeilinger (*et al.*) también realizó otros experimentos sobre variables ocultas estudiando primero un estado entrelazado (GHZ) de tres fotones espacialmente separados y después la violación de la desigualdad de Bell [D. Bouwmeester *et al.*, *Observation of Three-Photon Greenberger-Horne-Zeilinger Entanglement*, PRL **92**, 1345-49 (1999); J.-W. Pan *et al.*, *Experimental test of quantum nonlocality in three-photon Greenberger-Horne-Zeilinger entanglement*, Nature **403**, 515-519 (2000)]. Zeilinger (*et al.*) consiguió también entrelazar por primera vez dos partículas sin que mediara interacción previa entre ellas por medio de lo que denominaron *entanglement swapping* [M. Żukowski *et al.*, “*Event-Ready-Detectors*” *Bell Experiment via Entanglement Swapping*, PRL **71**, 4287-90 (1993); J.-W. Pan *et al.*, *Experimental Entanglement Swapping: Entangling Photons That Never Interacted*, PRL **80**, 3891-94 (1998)]. El *entanglement swapping* muestra que el entrelazamiento cuántico puede producirse sin que las partículas tengan una fuente común ni hayan interactuado en el pasado (*vid.* también Bell, *Atomic cascade photons and quantum mechanical nonlocality*, *Comm. on Atomic and Mol. Phys.* **9**, 121-26 (1980)).

Esta curiosa técnica ha servido para mostrar experimentalmente que, aunque  $C \approx R^2$ , en la MC los números complejos no sólo son útiles sino necesarios. La posibilidad de resolver la vieja cuestión de si es posible una MC basada en los números reales equivalente a la MC convencional sobre el cuerpo complejo, y hacerlo por medio una experiencia *à la Bell*, fue planteada por M.-O. Renou (ICFO) *et al.* en *Quantum theory based on real numbers can be experimentally falsified* [Nature **600**, 625-628 (2021)], en el que participan A. Acín (ICFO) y M Navascués (IQOQI, Viena). Bajo la hipótesis (necesaria) de que el espacio de Hilbert  $H$  de un sistema cuántico compuesto de dos sistemas  $S$  y  $S'$  es el producto tensorial de los espacios de Hilbert de los sistemas componentes,  $H_{SS'} = H_S \otimes H_{S'}$ , se acaban de realizar dos experiencias utilizando el *entanglement swapping* para resolver la cuestión planteada. La primera es la de M.-C. Chen *et al.*, *Ruling Out Real-Valued Standard Formalism of Quantum Theory* [PRL **128**, 040403-1-5 (2022)] y la segunda la de Z.-D. Li *et al.*, *Testing Real Quantum Theory in an Op-*



Aspect en el Aula Blas Cabrera (UCM) el 26-I-2017.

*tical Quantum Network* [PRL **128**, 040402-1-6 (2022)], con participación de A. Cabello (Univ. de Sevilla) en el primero de los dos experimentos y de M. Renou y A. Acín (ICFO) y M. Navascués (IQOQI, Viena) en el segundo. El resultado es que, *experimentalmente*, la MC debe construirse sobre el cuerpo complejo. De hecho, el experimento de M.-C. Chen *et al.* (véase también A. Beléndez, *Rev. Esp. de Fís.* **36**, #3, pág. 37) muestra que la cota para la existencia de una MC sobre el cuerpo real es violada en 43 desviaciones estándar.

Pero Zeilinger ha tenido, además, un papel esencial en el desarrollo de las tecnologías para la comunicación cuántica, realizando en particular uno de los primeros experimentos de *teleportación cuántica* o transmisión y reconstrucción a través de grandes distancias del estado de un sistema cuántico. Nótese que la teleportación cuántica no consiste en *copiar* un estado cuántico manteniendo el original, lo que no es posible por el teorema que impide la clonación [W.K. Woiters y W.H. Zurek, *A single quantum cannot be cloned*, Nature **299**, 802-803 (1982)], sino en transmitir y reconstruir a distancias en principio arbitrarias el estado de un sistema cuántico, proceso en el que el original no sobrevive. El grupo de Zeilinger ha realizado experiencias pioneras y espectaculares de teleportación cuántica [*vid.* D. Bouwmeester *et al.*, *Experimental quantum teleportation*, Nature **390**, 575-579 (1997); R. Ursin *et al.*, *Quantum teleportation across the Danube*, Nature **430**, 849 (2004); X.-S. Ma *et al.*, *Quantum teleportation over 143 kilometres (entre La Palma y Tenerife) using active feed-forward*, Nature **489**, 269-273 (2012), etc.]. La teleportación cuántica será un ingrediente esencial en las futuras redes de comunicación cuántica, internet cuántico incluido. De hecho, el entrelazamiento ya se puede lograr a grandes distancias [*e.g.*, J. Yin *et al.*, *Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers*, Science **353**, 1140-1144 (2017)].

### ¿Qué diría Einstein hoy?

Resulta casi inevitable preguntarse sobre la posición de Einstein si hubiera llegado a conocer las experiencias citadas. Bell, pese a que como se

ha mencionado trataba de reivindicar a Einstein frente a Bohr, reconoció ya en 1980: “me resulta difícil creer que la MC, que funciona tan bien para las actuales configuraciones prácticas, vaya a fallar estrepitosamente mejorando la eficiencia de los contadores y otros factores” [J.S.B., *Atomic cascade photons and quantum-mechanical nonlocality*, *Comm. on Atomic and Mol. Phys.* **9**, 121-126 (1980)]. Por su parte, Einstein habría contemplado con extraordinario asombro los resultados, pese a que la idea de localidad relativista que precisamente él estableció es la que constituye la dificultad esencial para el realismo local. En 1949, y en su mencionado ‘testamento científico’ [P.A. Schilpp ed., vol.II ‘*Reply to criticisms*’, pág. 666], reafirmaba su convicción con rotundidad: “de hecho, estoy firmemente convencido de que el carácter esencialmente estadístico de la teoría cuántica contemporánea ha de ser adscrito únicamente al hecho de que tal teoría opera con una descripción incompleta de los sistemas físicos”. Y añadía (pág. 672) que, en “una descripción física completa, la teoría cuántica estadística tomaría... un lugar aproximadamente análogo al de la mecánica estadística dentro de la estructura de la mecánica clásica. Estoy firmemente convencido de que ese será el desarrollo de la física teórica”.

Cabe preguntarse si la postura de Einstein hubiera sido tan rígida si hubiera tenido en cuenta el origen evolutivo de la naturaleza humana y lo que implica para nuestra percepción de la Naturaleza. La adhesión al realismo es consustancial con nuestra naturaleza biológica, pues la evolución darwiniana nos ha impuesto instintiva —i.e. evolutivamente— una visión clásica de la Naturaleza: tenemos ojos, no microscopios electrónicos. Y aunque la información que recibimos ha cambiado extraordinariamente desde Galileo como consecuencia de los instrumentos de todo tipo que hoy extienden nuestros sentidos, nuestro esquema *instintivo* para procesarla continúa siendo el mismo y por tanto clásico. De hecho, Bohr señalaba que la dificultad fundamental de EPR era suponer que siempre que un sistema no interactúa con otro puede considerarse que sus propiedades son independientes, problema que trasluce raíces ‘clásicas’, antropocéntricas, de las que por tanto cabría dudar *a priori*. Desde esta perspectiva, quizá no es sorprendente que Einstein no resaltara la figura de Darwin en algunos de sus múltiples escritos al margen de la física<sup>18</sup>, en especial teniendo en cuenta su

declarada devoción por Ludwig Boltzmann (1844-1906), quien dio cursos y conferencias sobre la teoría de la evolución. Boltzmann llamaba al s. XIX ‘el siglo de Darwin’, llegando a afirmar en 1905: “la salvación de la filosofía ha de venir de las enseñanzas de Darwin”. Dicho esto, no cabe duda de que Einstein contemplaría fascinado —al menos— los actuales desarrollos cuánticos y sus espectaculares consecuencias. Quién sabe: quizá pasaría por su excepcional y prodigiosa mente algo parecido a este comentario de Bell (1982): “lo que prueban las pruebas de imposibilidad es la falta de imaginación”. Por ejemplo, el Nobel (1999) G. ’t Hooft tiene sus propias ideas sobre la MC y la aplicabilidad del teorema de Bell: ver su *Explicit construction of Local Hidden Variables for any quantum theory up to any desired accuracy* [arXiv: 2103.04335v3 [quant-ph]]; *An unorthodox view on quantum mechanics* [arXiv: 2104.03179 [quant-ph]]. Por lo que se refiere a Bohr, cabría conjeturar si el pragmatismo es también la epistemología que subyace en la selección natural darwiniana responsable de la evolución [ver J. Faye, *Darwinism in disguise? A comparison between Bohr’s view on QM and QBism*, *Phil. Trans. R. Soc. A* **374**:20150236-1-112 (2016)]. Especulaciones aparte, y para concluir con la ‘paradoja’ EPR que inició este artículo, mencionaré que se siguen buscando descripciones alternativas que permitan mantener el realismo local y las predicciones de la MC. En particular, E. Santos (Univ. de Cantabria) considera que es posible compatibilizar el realismo local con la violación experimental de las desigualdades de Bell [E. S., *Local Model of Entangled Photon Experiments Compatible with Quantum Predictions Based on the Reality of the Vacuum Fields*, *Found. of Phys.* **50**, 1587-1607 (2020); *Realistic Interpretation of Quantum Mechanics*, *Cambr. Scholars Pub.*, (2022, 323 págs.)].

El análisis de los fundamentos de la MC ha originado avances de importancia estratégica. Tanto, que en 2018 la Comisión Europea lanzó la *Quantum Flagship Initiative* con la intención de situar a la UE en la frontera de la *Segunda Revolución Cuántica* que, en términos de inversión, lidera China muy destacadamente. La ‘paradoja’ EPR y el entrelazamiento de Schrödinger, ambos ¡de 1935!, han fomentado el desarrollo de numerosas tecnologías casi todas apellidadas ‘cuánticas’: computación cuántica, comunicación y criptografía cuánticas, teleportación cuántica, metrología cuántica<sup>19</sup>, etc. En la computa-

<sup>18</sup> Al fallecer Chaim Weizmann (1874-1952), el embajador en USA Abba Eban (1915-2002) le preguntó a Einstein si aceptaría la presidencia de Israel, que declinó afirmando: “sé algo de la Naturaleza, pero poco sobre los hombres”. Sin embargo, Einstein opinó *in extenso* sobre casi todo, por lo que sorprende que la evolución darwiniana no mereciera seriamente su atención. Véase J.A. de Azcárraga, *Albert Einstein, su ciencia y su tiempo*, Univ. de Valencia (2ª ed. 2007, 326 págs.).

<sup>19</sup> Sobre metrología véase el libro de Dolores del Campo y Miguel Á. Martín-Delgado, *¿Qué es el nuevo SI de unidades de medida?* Colección RSEF-FRA Física y Ciencia para todos, Ed. Catarata (2022, 158 págs.). M.Á. M-D. se ha preocupado también por la corrección de errores en las memorias cuánticas, esenciales para la construcción de ordenadores cuánticos; véase su reciente *Optimal Thresholds for Fracton Codes and Random Spin Models with Subsystem Symmetry*, *PRL* **129**, 230502-1-7 (2022), con H. Song et al.

ción cuántica, que ya imaginó en 1981 Richard Feynman (1918-88) [vid. J. Preskill, *Quantum computing 40 years later*, arXiv:2106.10522 [quant-ph], 2021], hay que recordar el papel pionero de J.I. Cirac y P. Zoller [*Quantum Computation with Cold Trapped Ions*, PRL **74**, 4091-94 (1995); *A scalable quantum computer with ions in an array of microtraps*, Nature **404**, 579-581 (2000)]. No obstante, la construcción práctica de ordenadores cuánticos superando los problemas vinculados al tamaño y a la decoherencia tendrá que esperar: para factorizar un número de 200 dígitos se necesitarían 3500 qubits, aunque gigantes como IBM o Google participan ya en la carrera. Así pues, en el proceso de zanjar la vieja controversia entre Einstein y Bohr realizando comprobaciones cada vez más precisas de las violaciones de las desigualdades de Bell, J.F. Clauser, A. Aspect y A. Zeilinger no sólo atrajeron la atención al carácter fundamental y revolucionario del entrelazamiento, sino que propiciaron la emergencia de esa segunda revolución cuántica y de sus tecnologías asociadas. Todas nacieron de la necesidad de poner a prueba, y como resultado invalidar, el realismo local de EPR; es seguro que traerán cambios profundamente disruptivos que abrirán el camino a otros futuros Nobel en el área. Y no es superfluo recordar hoy que nadie imaginó el futuro cuando Max Planck (1858-1947), “en un momento de desesperación”, introdujo su constante en 1900 para poder describir la radiación del cuerpo negro.

### Consideraciones finales

Los Nobel de 2022 constituyen un ejemplo paradigmático de cómo la investigación de un problema casi filosófico —la naturaleza de la ‘realidad’ en la MC— ha conducido a desarrollos tan espectaculares como sorprendentes, corroborando una vez más *The Usefulness of the Useless Knowledge* que decía Abraham Flexner<sup>20</sup> [Harper’s Magazine **179**, 544-552 (1939)]. Flexner creó y dirigió (1930-39) el Instituto de Estudios Avanzados (IAS) de Princeton, un instituto “with no duties, only opportunities” del que Einstein, von Neumann y muchos otros ilustres científicos y humanistas fueron miembros (no consta que von Neumann y Einstein discutieran el ‘teorema’ del primero, pero sí parece que Einstein era consciente de sus limitaciones). Por supuesto, no todo conocimiento es económicamente rentable, pero el presuntamente inútil puede resultar esencial. El Nobel Serge Haroche es un paladín de la importancia de la investigación básica movida por la curiosidad: insistió en ello el 13-III-2014 cuando visitó la RSEF hablando sobre “*Manipulating photons non-destructively and taming Schrödinger cats of light*” y el 19-VII-2017 durante



Serge Haroche (1944-)

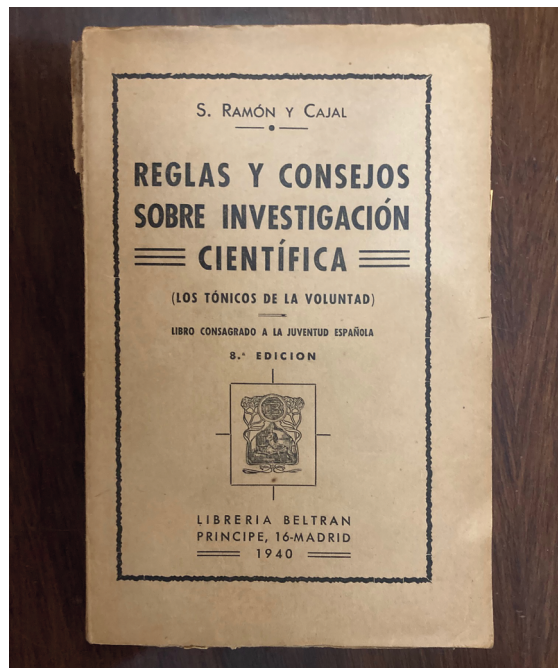
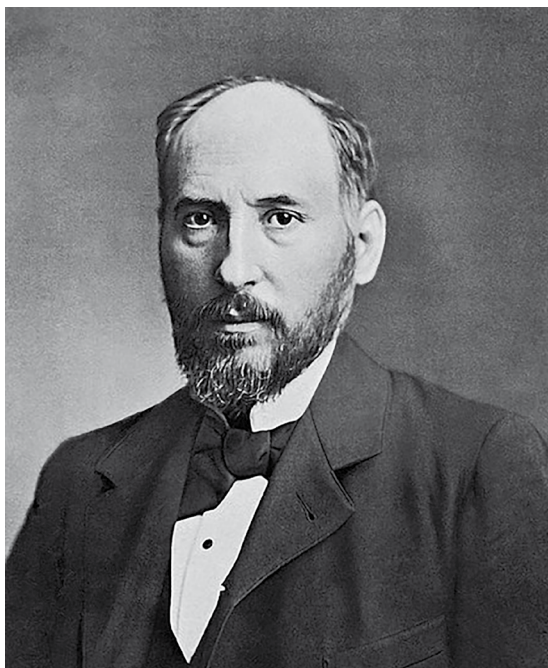
la Bienal de la RSEF de Santiago de Compostela, disertando sobre cómo la “*Fundamental research and technological innovation nourish each other*” (vid. la nota 7 y la entrevista de P. Jáuregui en El Mundo del 15-III-2014, págs. 46-47, final incluido). Pero no olvidemos que hace ¡125 años! y con motivo de su recepción en la RAC en 1897, Santiago Ramón y Cajal ya pronunció estas admonitorias palabras: “¿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 no sólo Cajal: el ingeniero, físico, matemático y dramaturgo José de Echegaray y Eizaguirre (1832-1916), primer presidente de la SEFQ (creada el 23-I-1903), afirmó también en la RAC en 1910, en un arrebató algo poético —fue Nobel de Literatura en 1904— pero certero, que “la ciencia pura.... que empezó como hermosura para el alma y para la inteligencia, concluye por ser alimento para la pobre vida corporal”.

Quizá en el futuro algunos premios Nobel de física puedan recaer en miembros de la RSEF; probablemente todos tenemos algún candidato y, si eso llegase, sería motivo de gran satisfacción. Pero no sería sorprendente que nuestras autoridades, con independencia de su color político, olvidaran la tradicional desatención de la Ciencia en España y trataran de patrimonializar esos Nobel como si en ellos hubieran tenido algo que ver. Sin embargo, recordando el Nobel *estadounidense* de Severo Ochoa, es posible que España continuara con su único Nobel científico, el de Cajal ¡de 1906! Esta singularidad pone en cuestión los sesudos informes que, basados en el número total de publicaciones, fantasean con que España es una gran potencia científica<sup>21</sup> aunque, eso sí, sin ‘suerte’ en la transfe-

<sup>20</sup> Además de encontrarse en la red, existe una reedición del ensayo de Flexner (Princeton Univ. Press 2017, 104 págs.) con un muy interesante prefacio del físico teórico Robbert Dijkgraaf, entonces director del IAS.

<sup>21</sup> Sobre la medida y el apoyo a la ciencia española, véanse los análisis de A. Rodríguez-Navarro (Coordinador General de la CNEAI 1993-97), *La evaluación de la investigación: España suspende*, Rev. Esp. de Fis. **35**, 2, 31-40 (2021) y *Cómo medir el éxito científico: los errores de España* (McGraw Hill, 2022, 229 págs.), que comenta el fallido Nobel que Francis Mojca debió recibir por el CRISPR. Véase también J. A. de Azcárraga, *Ciencia, Física,*

S. Ramón Cajal (1852-1934)



rencia de conocimiento. Por otra parte, los Nobel no premian la ciencia ‘normal’ en el sentido de Kuhn, sino la que propicia grandes avances científicos (Svante Pääbo es otro ejemplo este 2022). Así que concluiré con una comparación sencilla, que no requiere eruditos análisis y no es nada ajena a nuestro asunto, considerando el caso de Holanda. Este ‘pequeño’ país, con sólo una tercera parte de la población española, cuenta con *diecisiete* premios Nobel científicos. Respecto a las universidades (aunque no haya que sacralizar los *rankings*, sí son muy orientadores), Holanda tiene tres entre las 100 primeras del *ARWU de Shanghái* y nueve entre las 200 primeras; España no tiene ninguna entre las 100 primeras y sólo una —la UB— entre

las 200 (igual que en el *Leiden ranking*, por cierto). Y ello pese a que en su día casi todas las universidades españolas fueron declaradas —ministerialmente hablando— ‘*Campus*’ de *Excelencia Internacional*. Este 2022, tanto Holanda como España han estrenado nuevos responsables de Ciencia: desde enero, Holanda cuenta con un nuevo Ministro de Educación, Cultura y Ciencia, Robert Dijkgraaf, hasta ese momento director del mencionado IAS de Princeton. Y, consciente de la gran importancia de la *Segunda Revolución Cuántica*, Holanda ha establecido la *Quantum Delta NL* encargada de desarrollar la *Agenda Nacional para la Tecnología Cuántica* (NAQT), construyendo un ‘ecosistema cuántico’ en torno a *cinco* centros de excelencia investigadora en Delft, Eindhoven, Leiden, Twente y Amsterdam (DELTA). Así pues, y mientras en España no cambien las cosas estructuralmente (y hablo de apoyo real a la investigación y a los investigadores, facilitando además el regreso de los expatriados) huelga todo triunfalismo, presente, pasado y hasta futuro: la Ley de la Ciencia prevé que la financiación pública a la I+D alcance el 1.25 % del PIB en 2030, cuando la europea ya es del 2 %. Pensando en los magníficos Nobel de física de este año, sólo queda recordar a Cicerón en sus Filípicas: *Cuiusvis hominis errare, nullius nisi insipientis, in errore perseverare*.

R. Dijkgraaf (1960- )



*Investigación y Economía*, Rev. Esp. de Fís. **34**, 1, 1-6 (2020) y en <http://www.j.a.de.azcarraga.es>, Artículos Grales. nº 66.

**J. Adolfo de Azcárraga**  
Catedrático emérito de la  
Universidad de Valencia y  
miembro del IFIC (CSIC-UV)

