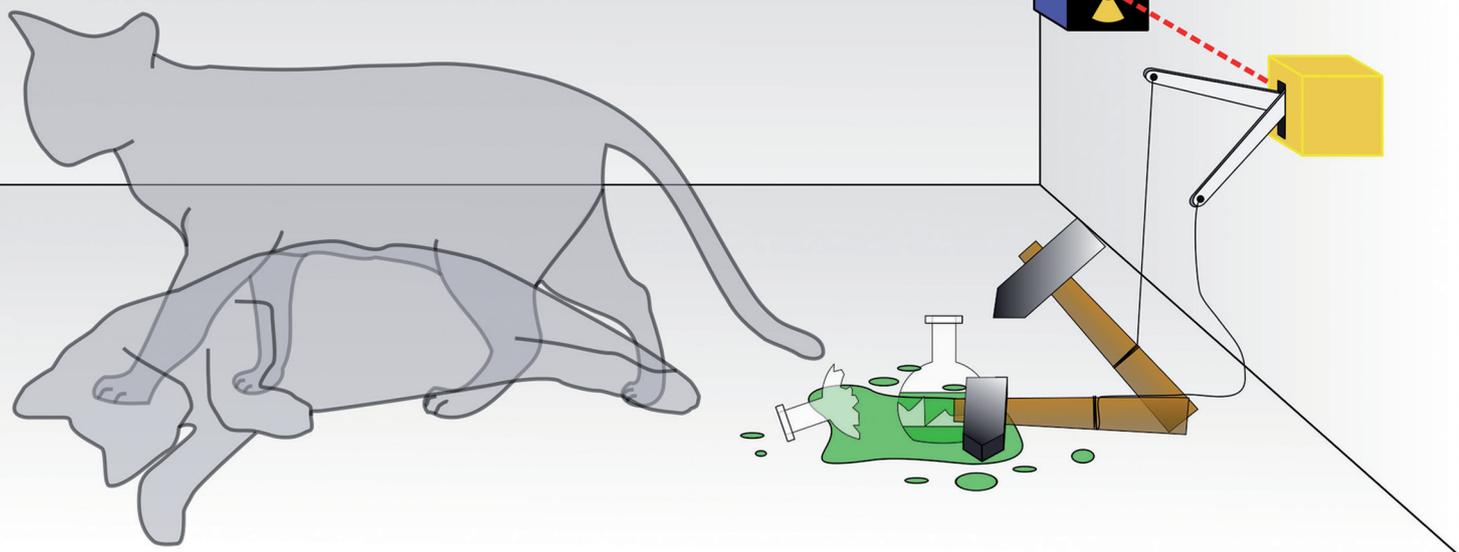


Fotones, iones y gatos cuánticos: en torno a la visita del Nobel Serge Haroche a la RSEF



¿Qué tienen en común el famoso gato de Schrödinger y los experimentos que condujeron al premio Nobel de física de 2012? En 1935 Erwin Schrödinger, uno de los creadores de la mecánica cuántica (MC) y premio Nobel en 1933 (con Paul A. M. Dirac), concibió una famosa paradoja. Insatisfecho con la visión de Bohr (Nobel 1922) y Heisenberg (Nobel 1932) de la MC, la que más tarde se llamaría ‘interpretación de Copenhague’, Schrödinger imaginó una caja cerrada conteniendo un gato y un átomo en un estado excitado (una caja con material radioactivo, decía) para ilustrar sus objeciones. El átomo, al pasar al estado fundamental, desencadenaba un fatídico mecanismo que liberaba un veneno que acababa con la vida del indefenso gato. La paradoja aparecía porque, al depender su bienestar de un proceso probabilístico —la transición cuántica del átomo al estado fundamental— la supervivencia del gato no podía determinarse sin abrir la caja, lo que obligaba a concluir que, antes de la observación, el gato estaba a la vez en cualquiera de las dos situaciones, suspendido entre la vida y la muerte. Átomo y gato estaban inevitablemente entrelazados; había dos posibilidades

para átomo y gato, y la observación del gato determinaba el estado del átomo.

En términos mecánico-cuánticos, cabría dar cuenta de este entrelazamiento representando el sistema átomo-gato por medio de una función de onda que describiese, al mismo tiempo, un gato vivo con el átomo excitado y un gato muerto con el átomo en el estado fundamental. Schrödinger acuñó el término *Verschränkung* (y el de *entanglement* en inglés) para este tipo de situaciones. Por supuesto, el sentido común dice que el gato está vivo o está muerto, no ambas cosas a la vez. La traducción física de ese sentido común es, sencillamente, que el gato constituye un sistema demasiado complejo, grande y abierto: los sistemas macroscópicos interaccionan con el entorno, la decoherencia es instantánea y todos los felinos son necesariamente clásicos. Ahora bien, ¿podrían construirse ‘gatos’ cuánticos en el laboratorio? Y, más aún: podrían medirse las propiedades de sistemas cuánticos en el laboratorio sin destruirlos, sin que se produjera su ‘demolición cuántica’?

Los padres de la MC eran aficionados a realizar experiencias imaginadas, *Gedankenexperiments*, para analizar y comprender mejor sus sorprendentes

implicaciones. Son bien conocidos el ‘microscopio de Heisenberg’ y la que Einstein propuso a Bohr en la sexta conferencia (1930) de Solvay (a la que asistió Blas Cabrera, junto a Bohr en la foto de los participantes), que supuestamente violaría el principio de indeterminación energía-tiempo. Tras un gran desconcierto inicial y una noche en vela, Bohr resolvió el problema con la ayuda de... ¡la relatividad general de su oponente! (las discusiones Einstein-Bohr continuaron hasta la muerte del primero en 1955; ninguno dio su brazo a torcer). En estos experimentos mentales se manipulaban libremente átomos, electrones o fotones, aunque ello se creyera imposible en la práctica. Schrödinger decía que la detección de una partícula era ‘física *post mortem*’, puesto que destruía el objeto de la investigación. En 1952 afirmó: “es apropiado decir que no investigamos con partículas individuales de la misma forma que no criamos ictiosaurios en un zoo. Escudriñamos rastros de acontecimientos mucho después que ocurrieron”. Y también: “en los experimentos pensados suponemos que sí lo hacemos. Pero ello conduce a consecuencias ridículas”. Los creadores de la MC consideraban que tales

experiencias nunca tendrían lugar en un auténtico laboratorio porque, por ejemplo, la ‘fragilidad’ de los fotones haría que éstos se destruyeran con la observación. Pero el futuro siempre sorprende: dos pioneros de la óptica cuántica, Serge Haroche (*Collège de France* y *École Normale Supérieure* —ENS— de París) y David Wineland (*National Institute of Standards and Technology* —NIST— y *University of Colorado*, Boulder), ambos nacidos en 1944, recibieron el Nobel de física de 2012 por “desarrollar métodos experimentales completamente nuevos que permiten la medida y la manipulación de sistemas cuánticos elementales”. La sorprendente lógica que entraña el principio de superposición (basta pensar en el experimento de la doble rendija), que aparecía velada en las observaciones cuánticas tradicionales que se realizan con muchísimas partículas, quedó directamente de manifiesto al manipular sistemas cuánticos individuales. Los equipos de Haroche y Wineland trabajaron simultáneamente: dos de los artículos fundamentales de cada uno de ellos aparecieron en 1996, consecutivos, en el *Physical Review Letters*.

Uno de los dos Nobel, el profesor Haroche, visitó la Real Sociedad Española de Física el pasado 13 de marzo con la ayuda —que deseo agradecer aquí— de la Embajada Francesa en Madrid, e impartió en el Salón de Actos Julio Rey Pastor de la Facultad de Matemáticas, ante más de trescientas personas, una magnífica conferencia (cuyo vídeo se puede encontrar en la web de la RSEF), *Manipulating photons non-destructively and taming Schrödinger cats of light*. En sus experimentos, Haroche usó dos espejos cóncavos superconductores de niobio de unos 6 cm de diámetro uno frente al otro, algo separados pero formando una cavidad capaz de almacenar unos cuantos fotones, a través de los cuales se enviaba un átomo de rubidio muy excitado (de Rydberg). El dispositivo resultante potencia mucho la interacción de la luz con la materia: los fotones atrapados rebotan entre los espejos miles de millones de veces durante unos 130 ms antes de perderse, recorriendo así distancias comparables al ecuador terrestre y, en consecuencia, pasan muchísimas veces a través del átomo. El papel del gato de Schrö-

dinguer lo juegan aquí los fotones en la cavidad, entrelazados¹ con el átomo de Rydberg; a la salida de la cavidad, el átomo se usa para revelar la presencia o no de fotones en ella. El entrelazamiento es, además, *no local* cuando el átomo abandona la cavidad, en la línea de la paradoja de Einstein, Podolski y Rosen (EPR) que se mencionará enseguida. Las técnicas de Haroche y su equipo han permitido también contar fotones de forma no destructiva por medio de *quantum non-demolition measurements* (1990), investigar la frontera cuántico-clásica creando y midiendo ‘estados gato cuánticos’ para observar (2008) su transición desde la superposición a la mezcla clásica para medir la decoherencia e, incluso, corregirla (2011), estabilizando el sistema por medio de un *feedback* cuántico. El profesor Haroche mostró en su presentación una película de... 50 milisegundos de decoherencia.

Al margen de que los dos experimentos analizan los fundamentos más profundos de la MC, los de Wineland son ‘duales’ de los de Haroche: ambos son caras de la misma moneda. Wineland atrapa materia cuántica, originalmente un ion de berilio manipulado *in situ* por fotones (láser) de forma no destructiva mientras que, como se ha dicho, en el experimento de Haroche uno o varios fotones son los atrapados en la cavidad y manipulados por la materia (el átomo de rubidio), también sin destruirlos. Por supuesto, aunque ambos experimentos asombrarían a los creadores de la física cuántica, también dejarían insatisfechos a algunos de ellos. Todo es consistente con los aspectos probabilísticos de la MC y no afectan al (¿misterioso?) proceso de la medida: así pues, Dios sí juega a los dados. Es bien sabido que a Einstein le repugnaba esa idea (*Gott würfelt nicht*, le dijo a Bohr); por lo que se refiere a Schrödinger, éste llegó a comentar a Bohr que “si todos esos saltos cuánticos fueran necesarios, estaría muy arrepentido de haber tenido algo que ver con la teoría cuántica”. Y Louis de Broglie afirmó en 1957: “la construcción de las fórmulas puramente probabilísticas que todos los teóricos

usan actualmente [estaba] plenamente justificada. Sin embargo, la mayoría de ellos, a menudo bajo la influencia de ideas preconcebidas derivadas de la doctrina positivista, han pensado que podían ir más allá y afirmar que el carácter incompleto e incierto del conocimiento [actual] de lo que realmente sucede en la microfísica es el resultado de una indeterminación real de los estados físicos y su evolución. Tal extrapolación no parece justificada en modo alguno”. Otro físico ilustre, el Nobel (1999) Gerardus ‘t Hooft, ha expresado recientemente ideas tan originales como difíciles en torno al entrelazamiento, la mecánica clásica, la teoría de cuerdas y la interpretación de la MC. Quizá, como dijo Murray Gell-Mann (Nobel 1969) en 2010, “el mundo parece cada vez más y más complejo, hasta que se alcanza un nuevo nivel de comprensión. Entonces las cosas vuelven a ser sencillas”.

Cuando en 1964 John S. Bell propuso sus famosas desigualdades en un artículo de cinco páginas y media en la efímera revista *Physics*, *On the Einstein Podolsky Rosen paradox*, dio forma matemática a las críticas que esos autores (EPR) habían formulado en 1935 a la visión dominante de la MC. En un famoso artículo, *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?* EPR, tras analizar el problema de hacer predicciones en un sistema por medio de medidas sobre otro que previamente había interactuado con él, concluían “que la descripción de la realidad que proporciona la función de onda no es completa”. Al considerar la función de onda de un sistema único —no factorizable— de dos partículas aparecen correlaciones de largo alcance (‘fantasmales acciones a distancia’) contrarias a toda intuición. En 1948 Einstein escribió a Max Born (Nobel 1954): “me inclino a pensar que la MC... debe ser considerada como una descripción incompleta e indirecta de la realidad”. Curiosamente Bell, a quien se puede considerar como el padre de la segunda revolución cuántica, deseaba reivindicar a Einstein, pues creía que “la superioridad intelectual de Einstein sobre la de Bohr era enorme: una vasta separación entre quien veía claramente lo que era necesario, y el oscurantista”. En cualquier caso, tras el artículo de Bell (y otros), la elección

1 O ‘enmarañados’, término menos adecuado porque parece indicar (como en parte *entanglement*) una especie de mezcla arbitraria y caótica ajena a la verdadera naturaleza del entrelazamiento cuántico.

entre la epistemología cuántica de Copenhague y la de Einstein —el *realismo local*— había dejado de ser una cuestión filosófica para pasar a ser resoluble en el laboratorio. Ya se podía ir más allá de constatar pragmáticamente que la MC funciona con toda precisión ('FAPP', *for all practical purposes*). Los famosos experimentos de Alain Aspect (1982), alguno antes y muchos otros después, mostraron la violación las desigualdades de Bell (y otras). Así pues, pese a su simpatía por Einstein, Bell contribuyó a realzar la visión de Bohr. Bell aceptó el veredicto experimental; frente a quienes intentaban buscar resquicios en las experiencias afirmó: "me resulta difícil creer que la MC, que funciona tan bien en cualquier situación práctica (¡FAPP!), vaya a fallar completamente al aumentar la eficiencia de los contadores" (la precisión experimental).

La MC no es adecuada para visiones intuitivas por una razón sencilla: nuestra intuición es clásica. La medida de la polarización de un fotón entrelazado con otro se refleja inmediatamente en éste aunque estén muy separados (ésta es la mencionada *spooky action at a distance*, o *spukhafte Fernwirkungen*, de la paradoja de EPR). En 1998, con fotones separados muchos kilómetros, se observó el entrelazamiento y la violación de las desigualdades de Bell en un experimento que usaba la red de fibra óptica de la compañía de teléfonos suiza. Los experimentos de Haroche y su equipo no resuelven por su parte el 'misterio' último de la medida en la MC, pero ayudan a comprender cómo tiene lugar la transición de la situación cuántica, en la que un 'gato' podría estar vivo y muerto, a la clásica, en la que sólo hay una opción. El fenómeno de decoherencia, estudiado por Wojciech A. Zurek (y otros) en los últimos veinte años, es el responsable de que los gatos sean clásicos.

Las experiencias citadas constituyen un ejemplo más de investigación motivada por el puro afán de conocer. En palabras de Haroche, "al igual que el arte existe para satisfacer la sed de belleza del ser humano, la ciencia existe porque necesitamos satisfacer nuestra curiosidad" (eso mismo, por cierto, gustaba de repetir Julio Palacios —don Julio— en sus clases). Haroche pudo satisfacer su curiosidad trabajando en un entorno privilegiado: comenzó en el la-



Serge Haroche y el autor de este artículo en la sala de reuniones de la RSEF.

boratorio Kastler-Brossel/ENS, fundado en 1951 por Alfred Kastler (Nobel de física 1966 por el bombeo óptico y sus aplicaciones) y su estrecho colaborador Jean Brossel. Allí hizo su tesis doctoral bajo la supervisión de Claude Cohen-Tannoudji (premio Nobel en 1997 por desarrollar métodos para enfriar y confinar átomos con luz láser), tesis que defendió en 1971 en la universidad de Paris VI (*Pierre et Marie Curie*) ante una comisión de cinco miembros, uno ya premio Nobel (Kastler) y dos futuros (Cohen-Tannoudji y P. G. de Gennes, éste en 1991). Después se trasladó como post-doc a Stanford (1972-73), con Arthur L. Schawlow, otro futuro premio Nobel (1981, por su contribución al desarrollo de la espectroscopía láser). Finalmente, el propio Haroche recibió el Nobel en 2012 en el Kastler-Brossel *lab.*, donde él y su equipo abrieron un nuevo campo en los 80, *cavity quantum electrodynamics*, hoy floreciente.

Al contrario de lo que se supone con frecuencia, la investigación dirigida por la curiosidad de los buenos investigadores acaba siendo tan rentable como inicialmente es ajena a toda finalidad práctica; los experimentos de Haroche y Wineland no son una excepción. Por ejemplo, Wineland ha conseguido relojes ópticos de tan fantástica precisión (cien veces mayor que la de los relojes 'convencionales' de cesio) que son sensibles a efectos relativistas, pues apre-

cian cambios de altura (gravedad) de sólo 30 cm. Esta exquisita sensibilidad podría utilizarse —por ejemplo— para mejorar los GPS, predecir terremotos, en prospecciones mineras o de petróleo². Todas estas aplicaciones tendrán una grande y evidente repercusión económica, aunque un economista difícilmente la asociaría a los fundamentos de la MC. La computación cuántica, ya imaginada por Richard Feynman (Nobel, 1965) en 1982, también puede estar más cerca: J. Ignacio Cirac (Max Planck de Garching e ilustre miembro de la RSEF) y P. Zoller (Innsbruck) realizaron en 1995 la primera propuesta realista para la construcción de un ordenador cuántico (QC), en la que mostraron que N iones fríos confinados en interacción con luz láser formarían un sistema lo suficientemente robusto como para obtener un QC. En una situación clásica, un interruptor puede estar en una de las dos posiciones po-

² Una reciente carta a *Nature* (6-feb-14) publica los resultados del equipo de Jun Ye (JILA-NIST, Univ. Colorado, Boulder), que ha obtenido un reloj basado en 'retículos ópticos', el más preciso hasta hoy, superando a cualquier reloj basado en un sólo ión: si funcionara durante cinco mil millones de años (500 más que la edad de la Tierra), no se desviaría ni un segundo. Las posibles aplicaciones de semejante precisión son absolutamente espectaculares e incluyen, para la física básica, el estudio de la posible variación temporal de sus constantes fundamentales.

sibles, cerrado o abierto, pero en una cuántica, un sistema con dos niveles — un qubit, *qu* por *quantum*— puede estar en una superposición de ambos estados. De igual forma, un estado de N qubits es una superposición en un espacio 2^N -dimensional, con lo que la potencia de cálculo de un QC crece exponencialmente. La clave de la propuesta de Cirac y Zoller es que la decoherencia sería despreciable durante el cálculo y que la eficiencia de la medida sería máxima. Wineland y su grupo fueron los primeros en realizar (1995) una operación con dos qubits (asociados a los niveles de los iones). Desde entonces, el campo de la información cuántica basado en iones confinados ha progresado muy considerablemente, aunque también se están explorando alternativas a éstos. Un QC ‘práctico’ podría resolver problemas intratables por los ordenadores clásicos —de Turing— como la factorización de números primos, que se usa para la encriptación y que es un problema de tipo ‘NP’ (polinómico no determinista)³. Tal QC constituiría un enorme avance y, a la vez, obligaría a cambiar todos los sis-

3 Realmente se desconoce si los procesos ‘NP’ podrían acabar siendo equivalentes a los ‘P’ (‘fáciles’). De hecho, la cuestión de si ‘NP’ = ‘P’, es uno de los seis problemas pendientes de los siete ‘problemas del milenio’ seleccionados por el Instituto Matemático Clay.

temas de seguridad actuales. Pero si se consigue obtener un QC de este tipo será en el futuro, pues el aumento de su ‘tamaño’ hará más difícil aislarlo adecuadamente del entorno; la interacción con éste produce decoherencia, la gran enemiga de todo QC. Al menos durante bastante tiempo, los ordenadores —como los gatos— serán todos clásicos. Pero, como muestran todos estos ejemplos, está claro que la física constituye una gran fuente de innovación, quizá la mayor hoy día.

Estas consideraciones sobre la importancia de la curiosidad, de la investigación *for the sake of it* y de las numerosas e insospechadas aplicaciones a las que conduce nos llevan a una última reflexión. El hecho de que en España la investigación dependa del Ministerio de Economía y Competitividad no deber ser ajeno al paupérrimo apoyo que recibe con independencia de la crisis que atraviesa el país aunque, a decir verdad, siempre ha sido muy escaso. Sería conveniente que la investigación recuperara el rango ministerial que se merece y que ya tuvo, como muestra el arco de la entrada al Ministerio en el 34 de la madrileña calle de Alcalá, sobre el que aún se lee ‘Ministerio de Educación y Ciencia’. La emigración de jóvenes investigadores (que no debe confundirse con las visitas o las estancias postdoctorales), la pérdida definitiva de buenos

cerebros que, como también señaló Haroche, forman parte esencial de la riqueza de un país, es una tragedia cuyas consecuencias futuras no parecen apreciarse en toda su magnitud. En esta breve narración ha aparecido un considerable número de premios Nobel de física; España sólo tiene uno científico, el de Ramón y Cajal de 1906 (debería ser innecesario aclarar que el de Ochoa de 1959 es de USA). Este dato debería ser suficiente para poner en su lugar opiniones autocomplacientes sobre la calidad de nuestras universidades, como las del Rector de la Univ. de Zaragoza y actual Presidente de la CRUE (ABC 6 de abril), en la línea ya tradicional de ésta. Pues, muy al contrario, la ausencia de un Nobel científico ¡en 108 años! es la prueba *irrefutable* de una disfunción endémica, de que algo se está haciendo mal y de que ya no caben más excusas. Cabe preguntarse qué sucedería si los gobiernos de la nación, además de la inevitable pléyade de asesores variopintos, tuvieran un Consejo Científico Asesor *permanente* de una decena de científicos del máximo nivel al que, como ya sucede con otros Consejos, tuvieran que oír antes de adoptar decisiones sobre política científica. Con independencia de que, por supuesto, éstas correspondieran en última instancia a los gobernantes.

José Adolfo de Azcárraga