

LA SEGUNDA REVOLUCIÓN CUÁNTICA

«What quantum mechanics really means» y la (re)escritura de la historia

Enric Pérez Canals



Abstracción de ordenadores cuánticos dorados. Conceptualización: Luisa Quiroga

El sentido de la historia

No es ninguna extravagancia decir que la historia se va reescribiendo a medida que transcurren los años. Principalmente, a causa de nuevos hallazgos o análisis que complementan o cambian las narraciones vigentes, pero también —y eso es más interesante— de las transformaciones que sufren las perspectivas contemporáneas. Así pues, los acontecimientos futuros, de un lado, y la mirada, de la otra, alteran la historia. Nos dirigen la atención hacia episodios pasados que de lo contrario habrían parecido intrascendentes o que, incluso, habrían quedado invisibles.

En la historia de la ciencia, este proceso es conocido, estudiado y temido al mismo tiempo. Una visión presentista es la que juzga los hechos pasados exclusivamente a partir de los valores actuales. Evitarla comporta que cuando se empieza una investigación, hay que intentar entender los casos de estudio en su propio contexto, más allá de sus vicisitudes posteriores. Pero, claro está, el éxito subsiguiente de una técnica o la confirmación generalizada de una teoría cambia a menudo la percepción de sus orígenes, particularmente en relación con las otras técnicas y teorías con que entraron en competencia. La historia, como es sabido, la escriben sobre todo los vencedores.

En el ámbito más concreto de la historia de la teoría cuántica, el auge de la computación asociada y de toda la ciencia merecedora del Premio Nobel de Física del 2022 nos permite asistir a una de estas transformaciones. Episodios que hasta hace unos años no formaban parte esencial de la historia canónica de la disciplina, hoy se convierten en parte prominente.

La historia se va reescribiendo a medida que transcurren los años, a causa de nuevos hallazgos que complementan o cambian las narraciones vigentes, pero también de las transformaciones de las perspectivas contemporáneas

En una entrevista que podemos encontrar en el sitio web de la Fundación Nobel, el profesor Thors Hans Hansson, miembro de la Academia Sueca, explica —refiriéndose a la concesión del premio del 2022— como la computación cuántica muestra “lo que realmente significa la mecánica cuántica”. [1] No es una frase que tenga que pasar desapercibida. Imre Lakatos argumentaba que la diferencia principal entre su manera de entender el progreso científico y la de Karl Popper consistía en qué, para este último, antes de que una teoría haya sido refutada, nunca podremos saber cómo habrá que modificarla; para Lakatos, en cambio, antes de que una teoría se haya modificado, nunca podremos saber en qué sentido se ha refutado. [2] Según eso, en el caso que nos ocupa, los últimos desarrollos nos indican con más precisión donde fracasaba la teoría clásica.

La segunda revolución cuántica (1970-2022)

Ya al inicio del siglo XXI se empezó a hablar de la segunda revolución cuántica, en referencia a los avances tecnológicos que permitían intuir la computación y la simulación cuánticas. La primera revolución había sido la conceptual, y tuvo lugar cien años antes. Nosotros nos fijaremos en las implicaciones conceptuales de la segunda sobre la primera.

John Clauser, Alain Aspect y Anton Zeilinger se han llevado el premio por su ingenio y su praxis experimental, que ha ido eliminando las famosas lagunas (*loopholes*) de los montajes que buscan la evidencia empírica del entrelazamiento. Poco a poco han ido arrinconando las grietas, los vacíos que podrían poner en entredicho la confirmación de esta propiedad —el entrelazamiento— que hoy simboliza la esencia del reino cuántico. Han comprobado que la medida en uno de los subsistemas afecta, instantáneamente, al estado del otro subsistema con el cual estaba entrelazado antes de la medida. Desde los primeros experimentos rudimentarios con fotones provenientes de cascadas de desexcitaciones atómicas, a finales de la década de los sesenta, hasta los montajes actuales que contienen varios fotones e incluso elementos masivos, el protagonista destacado, la solución que se quería detectar e iluminar, era el entrelazamiento. Por el gran interés que presenta en cuestiones como la encriptación, pero sobre todo porque es una propiedad distintiva y

fascinante que poseen los objetos de la naturaleza en escalas atómicas y que fuerza a considerar vínculos instantáneos entre objetos distantes.

¿Desde cuándo esta propiedad ha adquirido este carácter central en la física moderna? [3] Seguimos tirando hacia atrás.

Desigualdades y contracultura (1964-1970)

Después de la Segunda Guerra Mundial (1939-1945), la investigación en física experimentó un fuerte impulso. El número de estudiantes de física aumentó notablemente, especialmente en Estados Unidos (los países europeos tardaron unos años en recuperarse). Este impulso, como es lógico, no fue desinteresado, y estaba dirigido sobre todo a acelerar la evolución de las aplicaciones técnicas. El bagaje de la nueva hornada en disciplinas de cariz más humanístico, como la filosofía, decayó de manera estimable si lo comparamos con las disciplinas científicas del primer tercio del siglo xx.

A nivel docente, el nuevo talante y la cantidad de alumnos en las aulas cambió sustancialmente los contenidos y las metodologías, y se dio más peso a los cálculos y menos a las cuestiones conceptuales. Este nuevo panorama se sintetiza frecuentemente con la fórmula “shut up and calculate” (‘calla y calcula’): hace falta dejar de lado el debate sobre los cimientos y centrarse en los cálculos. Para los gobernantes, la rivalidad tecnológica con el bloque comunista aconsejaba y reforzaba este planteamiento.

David Kayser ha argumentado, de forma convincente, que los movimientos contestatarios de finales de la década de los sesenta quedaron reflejados, en el ámbito de la física, en un grupo de jóvenes que, a principios de la década de los setenta, se negaron a asumir esta tendencia y reivindicaron y recuperaron el debate sobre la interpretación de la mecánica cuántica. [4] En más de una universidad de California se crearon grupúsculos de físicos que cuestionaban la llamada *interpretación de Copenhague* (esta manera de referirse a la ortodoxia cuántica se había establecido sólo un par de décadas antes, precisamente por oposición a las teorías alternativas) e intentaron establecer vínculos con enseñanzas de religiones orientales y fenómenos psíquicos como la telepatía. Afrontaron las discusiones sobre el significado de la teoría cuántica centrándose, sobre todo, en el teorema de Bell.

El entrelazamiento simboliza la esencia del reino cuántico, por el gran interés que presenta en cuestiones como la encriptación, pero sobre todo porque es una propiedad fascinante de los objetos de la naturaleza a escalas atómicas que fuerza a considerar vínculos instantáneos entre objetos distantes

John S. Bell había publicado, en 1964, un teorema que permitía distinguir experimentalmente si un sistema perfectamente descrito por la mecánica cuántica se podía

someter a una descripción causal o no. Según la teoría cuántica, en los sistemas entrelazados las partes no tienen parámetros definidos hasta que no se produce la separación a través de una medida. Y, cuando esta se produce, la determinación de los parámetros es inmediata en todos los subsistemas. Bell encontró una manera de evaluar en el laboratorio si estos parámetros estaban fijados antes de la medida (aunque los experimentadores desconocieran los valores), o si (cómo prescribía la mecánica cuántica) sólo se determinaban en el preciso momento de medirlos. Físico teórico de profesión, Bell tuvo que preparar y discutir esta contribución al margen de sus horas de trabajo. Entonces, muchos físicos (y editores de revistas) consideraban que estas cuestiones no entraban propiamente en el ámbito de la física. El entrelazamiento estaba lejos de representar “lo que realmente significa la mecánica cuántica”.

Guerra fría y causalidad oculta (1945-1964)

Una víctima de la guerra fría, el norteamericano David Bohm, ya había sufrido este menosprecio al inicio de su carrera, junto con un exilio forzado de Estados Unidos, en 1949, por sus ideas comunistas. Pero fueron sus contribuciones las que despertaron la curiosidad de Bell. Bohm había hecho un doctorado que contenía material clasificado, por su relación con el proyecto Manhattan. La política y la física, en su caso, iban de la mano: el materialismo dialéctico fundamentaba el realismo y el determinismo de sus ideas. O sea, nada más lejos de los *hippies*. Cuando Bohm abandonó el comunismo, también desistió de la explicación causal e, incluso, hizo alguna propuesta que tenía en cuenta el papel de la conciencia en la nueva física, espoleado por su relación con el pensador oriental Jidú Krisnamurti (“el observador es el observado”), ahora sí en la línea de los jóvenes que reanudaron sus reflexiones a principios de los años setenta. [5]

Bohm no había aceptado de manera acrítica la interpretación ortodoxa de la mecánica cuántica y formuló, en 1952, una teoría causal que reproducía resultados conocidos de la mecánica cuántica. Y es que la aleatoriedad de los procesos elementales, es decir, la imposibilidad de hacer una teoría atómica completamente determinista, era entonces el rasgo más polémico. Cabe decir que ni Albert Einstein ni Erwin Schrödinger, dos ilustres disidentes, estuvieron muy interesados en esta propuesta, pero es indudable que los trabajos de Bohm contribuyeron de manera distinguida a poner en el centro del debate problemas como el de la medida o la posibilidad de diseñar una teoría determinista, en contra de lo que se pensaba y de lo que un teorema de John von Neumann había descartado prematuramente en 1932. Bohm recibió más reconocimiento al final de su vida (murió en 1992), cuando los temas que había tocado se iban convirtiendo progresivamente en temas primordiales a causa de las transformaciones sociales, políticas y tecnológicas.

Este episodio ilustra maravillosamente la fecundidad de la controversia y el debate en ciencia. Aunque Bohm no consiguió triunfar en la construcción de una teoría alternativa, su aportación para poner en el centro de la discusión la posibilidad de elaborar una, de plantear qué quiere decir medir y de considerar seriamente la no localidad, fue primordial. La teoría del calórico del siglo XVIII o el éter del siglo XIX son ideas que tuvieron relevancia en el surgimiento de nuevas teorías (termodinámica o relatividad), y no se tienen que

borrar de la historia de la física, ni se tienen que explicar como episodios anecdóticos. Muchas de sus características han dejado huella en la forma final de las teorías actuales. Eso es aplicable a las ideas de Bohm y al lugar que hoy ocupan las desigualdades de Bell.

La incertidumbre de la realidad y los primeros disidentes (1925-1945)

Continuando con las retrogradaciones, nos chocamos ahora con un escollo ya anunciado: la Segunda Guerra Mundial, tiempos difíciles para los disidentes. En los años inmediatamente previos, prácticamente sólo hubo investigación cuántica aplicada a la física nuclear. El debate sobre los fundamentos se extinguió. No obstante, no tardaron en llegar los primeros síntomas de desencanto en relación a la interpretación hegemónica que había quedado establecida después de las discusiones fundacionales de la década de los años veinte. Fue entonces cuando el concepto de entrelazamiento, ausente en los primeros debates, irrumpió en escena. Eso sí, sin ser el personaje principal.

En efecto, después de un acuerdo más o menos consensuado en otoño de 1927 (cuando simbólicamente se cierra la cuestión en la quinta conferencia Solvay), a principios de la década siguiente empezaron a surgir las voces críticas. Sin duda, los artículos más importantes en este sentido son los de Albert Einstein, Boris Podolski y Nathan Rosen, y el de Erwin Schrödinger, ambos de 1935. Son dos contribuciones relacionadas porque el artículo de Einstein, Podolski y Rosen animó a Schrödinger a publicar su análisis crítico del estado de la teoría cuántica. Él lo llamó “confesión”.

Einstein, Podolski y Rosen habían ideado un experimento mental que permitía obtener magnitudes de un subsistema midiendo otro. Una forma ingeniosa de dotar de realidad propiedades pretendidamente excluidas de la teoría por el principio de incertidumbre. De esta manera, concluían que resultaba evidente que la mecánica cuántica no era una teoría completa. Para los autores, la supresión de variables clásicamente imprescindibles para definir completamente un estado, así como la dependencia de esta supresión del tipo de experimento realizado, era el aspecto más turbio de la interpretación dominante.

Unos meses después, Niels Bohr respondió que, en realidad, las variables escogidas por los autores no estaban sometidas a las limitaciones del principio de incertidumbre, y desmontó su argumento. Ahora bien, reconocía y desarrollaba el punto señalado y repensaba el significado del mismo principio de incertidumbre, representante emblemático de la nueva mecánica, que hasta entonces se había entendido como una consecuencia física de la perturbación originada por la medida. [6] Después de este debate, el entrelazamiento entre subsistemas obligaba a matizar el concepto de perturbación, porque podía afectar instantáneamente a sistemas distantes.

Fue en la discusión de Schrödinger (anterior a la respuesta de Bohr) donde la palabra entrelazamiento (**Verschränkung**) fue acuñada con el nuevo significado. Schrödinger, sin embargo, también quiso poner el foco en la superposición de estados ideando la célebre paradoja del gato. Si la superposición de estados posibles también era un estado posible, se

llegaba a contrasentidos flagrantes (al menos en el ámbito de los objetos cotidianos). Además, en otro artículo del mismo año, llevó más allá los efectos del entrelazamiento y propuso una manera de modificar el estado de un subsistema a partir de medidas en otro subsistema separado espacialmente del primero; lo que hoy se conoce como *quantum steering* (dirección cuántica) en el contexto de la información y la computación cuánticas.

Schrödinger puso el foco en la superposición de estados ideando la célebre paradoja del gato

Así, el año 1935 ya tenemos el concepto de entrelazamiento definido, diez años después de la primera formulación de la mecánica cuántica (Werner Heisenberg, 1925). Era una consecuencia llamativa de la teoría, no su implicación más significativa. Un punto que para Einstein o Schrödinger era lo bastante oscuro para centrar la atención. Einstein se refirió en alguna ocasión como “spooky action at a distance” (acción fantasmagórica a distancia).

Unos orígenes discretos: los saltos cuánticos (1900-1925)

Llegamos ya al final de la historia, el origen de la teoría cuántica. ¿Qué nuevas propiedades de la materia y la radiación atrajeron la atención de los primeros físicos involucrados?

Hay argumentos para atribuir el honor del descubrimiento a Max Planck, en 1900, pero también a Einstein, en 1905. [7] Básicamente, la semejanza radica en dos aspectos: por una parte, la conciencia de la trascendencia del paso que se estaba dando (cuantizar la energía); y de la otra, la radicalidad de la cuantización propuesta. Einstein defendió que el intercambio energético entre la luz y la materia tenía lugar en paquetes, y lo extendió a la constitución lumínica misma. Planck restó importancia a la cuantización, e incluso trató de mitigarla circunscribiéndola a la materia y a los procesos de emisión.

Einstein, pues, fue el primero en evidenciar la extrañeza y la relevancia de la hipótesis que da nombre a la teoría. Pero su versión incluía una primera característica que podría permitir intuir trazas de no localidad. Si la luz se transmite como una onda pero intercambia energía en paquetes, de alguna forma tiene que haber una concentración instantánea, un proceso espaciotemporal no local que escape de las explicaciones del electromagnetismo. En aquel momento no se tuvo en cuenta esta cuestión porque, en general, la hipótesis de Einstein se desterró: no se quería sustituir la teoría ondulatoria de la luz por una teoría que explicaba poca cosa más que el efecto fotoeléctrico. Quedaban todavía unos cuantos años para que surgiera el concepto de la dualidad. En el caso de Einstein, pocos. En 1909, confundido por estas manifestaciones contradictorias de la luz, sugirió por primera vez, y sin que casi nadie le diera apoyo, que la futura solución al enigma vendría de un compromiso entre la teoría ondulatoria y la concepción corpuscular. [8]

El siguiente hito importante fue el modelo atómico de Bohr, en 1913. El físico danés superó,

a base de postulados, dos problemas gigantes que afrontaron los constructores de modelos atómicos: la hiperestabilidad (los elementos son estructuras a prueba de colisiones) y la fuente de los espectros. Postuló la existencia de estados estacionarios en que los electrones atómicos, a pesar de estar acelerados, no radiaban; por otra parte, en su modelo, la radiación emitida por los átomos dependía sólo de la diferencia de energía entre los estados estacionarios implicados, y no tenía nada que ver con la frecuencia de sus movimientos orbitales, como preceptuaban las ecuaciones de Maxwell. Más allá de esta axiomatización contraria a la física vigente, algunos colegas de Bohr objetaron la pérdida de causalidad: si un electrón emite a la frecuencia que corresponde a esta diferencia energética, lo tiene que hacer durante un proceso que todavía no ha acabado y donde el estado final determina la frecuencia de la radiación emitida previamente. Una nueva sombra sobre la causalidad (en este caso, una inversión de la relación causa-efecto), pero que en su momento tampoco encendió la polémica.

Hay argumentos para atribuir el honor del descubrimiento a Max Planck, en 1900, pero también a Einstein, en 1905. El siguiente hito importante fue el modelo atómico de Bohr, en 1913.

Para acabar, conviene ahora saltar al principio de los años veinte, justo antes del nacimiento de la mecánica cuántica, cuando Louis de Broglie introdujo la dualidad onda-corpúsculo y Einstein la incluyó en su tratamiento del gas ideal cuántico en 1924. Le sirvió para explicar una propiedad misteriosa de las partículas de gas en la nueva teoría: se comportaban como un todo, la individualidad de las partículas se había desvanecido hasta el punto que no tenía sentido localizarlas o imaginarlas por separado. Es lo que muchos años después se conocerá como *indistinguibilidad cuántica*. El todo era definido, las partes no. El mismo Einstein se preguntó por este tipo de interacción o conexión que mantenía todas las partículas del gas funcionando de forma colectiva. Claro está, sin embargo, que para el padre de la relatividad, una interacción, por misteriosa y desconocida que fuera, no podía ser instantánea, y por eso apeló a la hipótesis de De Broglie.

El entrelazamiento, así pues, volvía a dejarse ver, ahora con más fuerza, pero tampoco se entendió como el tuétano cuántico. Las partículas se hicieron indistinguibles, una forma de incluir en la antigua idea corpuscular una especie de campo que las mantenía unidas, interconectadas.

Todo es un poco confundido, pero con los años se irá aclarando y delimitando. Cuantización, discretización, incertidumbre, superposición, aleatoriedad... y entrelazamiento. Queda por saber qué nos deparan los próximos estudios y desarrollos.

REFERÈNCIES I NOTES

1 — Consultar la entrevista entera en la web de la Fundación Nobel, en el enlace ja.cat/NoblePrizePhysics2022

- 2 — Lakatos, I. (1974). *The role of crucial experiments in science: Studies in History and Philosophy of Science*, núm. 4, p. 309-325.
- 3 — Para una narración completa de esta historia (hasta el 2005), consultar Gilder, L. (2008). *The age of entanglement: When quantum physics was reborn*. Nueva York: Alfred Knopf.
- 4 — Kayser, D. (2011). *How the hippies saved physics: Science, counterculture and quantum revival*. Nueva York: Norton & Company.
- 5 — Freire, O. (2015). *The quantum dissidents: Rebuilding the foundations of quantum mechanics (1950-1990)*. Heidelberg: Springer.
- 6 — Beller, M. (1999). *Quantum dialogues: The making of a revolution*. Chicago: Chicago University Press.
- 7 — Duncan, T.; Janssen, M. (2019). *Constructing quantum mechanics*. Nueva York: Oxford University Press.
- 8 — Navarro, L. (2020). *El desconocido Albert Einstein*. Barcelona: Tusquets.

**Enric Pérez Canals**

Enric Pérez Canals es profesor agregado del Departamento de Física de la Materia Condensada de la Universidad de Barcelona. Su investigación se centra en la historia de la física moderna, concretamente en las interrelaciones entre la teoría cuántica y la física estadística. Imparte la asignatura de Historia de la Física en la Facultad de Física desde el año 2010, y es autor del libro *Física estadística. De estados y partículas: una mirada nueva a viejas controversias* (Edicions UB, 2018), junto a Pere Seglar i Comas. También ha escrito y dirigido piezas de teatro breves inspiradas en episodios y conceptos de la física moderna.