

Carta a la Editora

1900-1925: La ruptura de la Física

1900-1925: The breakdown of physics

Por recomendación de la UNESCO, la Asamblea General de la ONU proclamó 2025 como *Año Internacional de la Ciencia y la Tecnología Cuánticas* (Resolución A/RES/78/287, <https://docs.un.org/es/A/RES/78/287>) para conmemorar el primer centenario de la Mecánica Cuántica, cuyo nacimiento se reseña con el artículo “Sobre la reinterpretación teórico-cuántica de las relaciones cinemáticas y mecánicas” de Werner Heisenberg (**Heisenberg**, 1925). Durante la mayor parte del siglo 20, esta disciplina se desarrolló con el fin primordial de explicar la estructura de la materia y su interacción con la radiación. Pero, en las postrimerías de ese siglo y lo corrido del 21, la Mecánica Cuántica irrumpió definitivamente en el ámbito de la tecnología más sofisticada, principalmente en los campos de la computación, las telecomunicaciones y la ciencia de los materiales. Sus aplicaciones actuales son diversas y no sólo ocupan buena parte del paisaje tecnológico cotidiano a escala global, sino también las expectativas y tendencias de la tecnología y la innovación para el futuro cercano y mediano. Motivada por este panorama, la ONU busca con la celebración incentivar la conciencia sobre el impacto de las tecnologías cuánticas en la vida moderna, además de apuntar a objetivos socio-culturales globales conforme a sus principios misionales.

No obstante, la historia de la física durante el primer cuarto del siglo 20, antes de la publicación del artículo de Heisenberg, merece toda nuestra atención, no solo como reseña de época, que algunos llaman *edad dorada de la Mecánica Cuántica* (**Eisberg**, 1978), sino primordialmente, como evolución del pensamiento humano en la búsqueda de la comprensión plena de la naturaleza, con impactos profundos e indiscutibles en la educación y en la cultura. No se trató de un “salto cualitativo”, producto de la complejidad lograda por la acumulación de conocimientos, sino de una ruptura rotunda de la concepción de la naturaleza, establecida a lo largo de los tres siglos precedentes, al estilo de la declaración de uno de sus protagonistas, Louis de Broglie: “La historia de la ciencia muestra que su progreso se ha visto constantemente obstaculizado por la influencia tiránica de ciertas concepciones que han llegado a ser consideradas como dogmas. Por esta razón, es conveniente someter a examen periódico y a profundidad los principios que hemos llegado a admitir sin discusión” (**De Broglie**, 1956). La Historia de esa ruptura ilustra en detalle el ejercicio de lo que hoy llamamos *pensamiento crítico*, con una participación protagónica de la intuición y de la actitud inquebrantable de salvaguardar la investigación científica. Irónicamente, este último aspecto ha sido puesto en entredicho por los liderazgos políticos actuales, en un momento de innegable florecimiento de la producción tecnológica.

El siglo 19 marcó la época en la que los físicos creyeron saberlo todo de su disciplina. Desde la revolución científica del siglo 17, siguieron los lineamientos trazados por Galileo Galilei e Isaac Newton, entre otros, sobre el quehacer en física. Galileo expresó que “la filosofía está escrita en ese grandísimo libro [de la naturaleza] que continuamente está abierto ante nuestros ojos (me refiero al universo), pero no se puede entender si antes no se aprende a entender la lengua, y conocer los caracteres en los que está escrito. Este libro está escrito en lengua matemática, y los caracteres son triángulos, círculos, y otras figuras geométricas, sin las cuales es imposible entender ni una palabra; sin ellos es como girar vanamente en un oscuro laberinto” (**Galilei**, 1623), mientras que Newton estableció las reglas de filosofía natural: “(i) No se deben admitir otras causas que las necesarias para explicar los fenómenos. (ii) Los efectos del mismo género deben siempre ser atribuidos, en la medida en que sea posible, a la misma causa. (iii) Las cualidades de los cuerpos que no son susceptibles de aumento ni disminución y que pertenecen a todos los cuerpos sobre los cuales se pueden hacer experimentos, deben ser miradas como pertenecientes a todos los cuerpos en general. (iv) En

la filosofía experimental, las proposiciones sacadas por inducción de los fenómenos deben ser miradas, a pesar de las hipótesis contrarias, como exacta o aproximadamente verdaderas, hasta que algunos otros fenómenos las confirmen enteramente o hagan ver que están sujetas a excepciones” (Newton, 1686). Esos lineamientos llevaron a Newton mismo a la creación del Cálculo Analítico y de la Mecánica, cuyo nivel más alto de abstracción matemática fue alcanzado en los siglos 18 y 19 por Joseph Louis Lagrange y William Rowan Hamilton respectivamente. Los mismos lineamientos condujeron, ya en el siglo 19, a Augustin-Jean Fresnel a su célebre “Memoria sobre la difracción de la luz” (Fresnel, 1826) que, luego de una dramática historia entre 1815 y 1818, inauguró la edad dorada de la concepción ondulatoria de la luz. El pináculo de esta edad dorada fue alcanzado por James Clerk Maxwell en su celebrado artículo “Una teoría dinámica del campo electromagnético” (Maxwell, 1875), que consagró la naturaleza electromagnética de las ondas luminosas. Finalizando el siglo 19, Ludwig Boltzmann aportó los fundamentos de la física estadística con su teoría cinética de los gases (Boltzmann, 1896). Sobre esas tres bien fundadas columnas de la ciencia, además de las matemáticas, se apoyó la convicción de los físicos decimonónicos de haber alcanzado el conocimiento completo de la naturaleza, quedando solo la misión de realizar experimentos enriquecedores de ese conocimiento y de mejorar la precisión de las constantes universales.

Sin embargo, la historia de la física dio un giro drástico apenas comenzando el siglo 20, a causa de un conjunto de experimentos cuyos resultados no pudieron apoyarse en dichas columnas de la ciencia. En 1900, la electrodinámica y la física estadística juntas, en manos de los reputados físicos John William Strutt (Lord Rayleigh) y Sir James Jeans, no pudieron explicar el espectro de radiación del cuerpo negro, cuyo estudio, que ocupó la segunda mitad del siglo 19 desde su postulación por Gustav Robert Kirchhoff en 1856, había dado lugar a las leyes empíricas de Stefan-Boltzmann (1879) y de desplazamiento de Wien (1893). La electrodinámica tampoco pudo explicar el “efecto fotoeléctrico” demostrado experimentalmente por Philipp Lenard en 1902, inspirado en una anotación escrita casi década y media antes por Heinrich Hertz; ni el espectro de emisión del hidrógeno, llamado “serie de Balmer” porque, en 1885, Johann Jacob Balmer sintetizó una fórmula empírica que predecía las longitudes de onda de las líneas de dicho espectro (Eisberg, 1978).

Si bien no deja de impresionar que los límites explicativos de teorías tan elaboradas y elegantes se establecieran poco tiempo después de su formulación, impacta igualmente o incluso más, la manera en que los físicos de inicios del siglo 20 emprendieron la tarea de superarlos. La mayoría tenía menos de 30 años. Todos ellos compartían una actitud decidida de renuncia, parcial o total, a esos tres pilares de la ciencia del siglo 19 y sus contribuciones fueron galardonadas con el premio Nobel de física. Además, las explicaciones aportadas no fueron propuestas en el marco de teorías bien establecidas y, peor aún, contradijeron sin pudor principios de dichos pilares. De hecho, el término *postulado*, que atañe a proposiciones cuya verdad se admite sin pruebas, es decir, con base en posturas intuitivas del sujeto que las propone, constituye una marca de época de la física entre 1900 y 1925. En efecto, en ese lapso sólo se produjeron dos teorías axiomáticas rigurosas: la de la Relatividad de Albert Einstein en dos momentos, el primero publicado en 1905, conocido hoy como Relatividad Especial (Einstein, 1905 a) y el segundo, publicado en 1916, denominado Relatividad General (Einstein, 1916); y la tesis doctoral de Louis de Broglie “Investigaciones sobre la teoría de los *quanta*”, presentada en 1924 y publicada al año siguiente (De Broglie, 1925), cuyo final, sin embargo, fue más bien trágico.

Específicamente, la deducción de la fórmula matemática que se ajusta a los resultados experimentales del espectro de radiación de cuerpo negro fue presentada, antes de que terminara el año de 1900, por Max Planck, de 42 años, luego de postular el *quantum* de energía electromagnética como una estrategia matemática, pues no se convenció de su existencia física ya que contradecía la naturaleza ondulatoria de la radiación. Así mismo, la fórmula matemática que se ajusta a los resultados experimentales del efecto fotoeléctrico fue deducida por Einstein de 26 años, en 1905, postulando la ocurrencia de colisiones entre los *quanta* de radiación y los electrones de las placas iluminadas por la luz. Einstein había aceptado sin más la realidad física de los *quanta* de Planck (Einstein, 1905 b). Por su parte,

Niels Bohr de 28 años aceptó sin explicaciones la estructura nuclear del átomo, sugerida por los descubrimientos experimentales del electrón en 1897 y del núcleo atómico en 1911, pero cuya estabilidad había sido puesta en duda por las leyes de la electrodinámica. En 1913, Bohr formuló cuatro postulados que negaban la validez de dichas leyes en relación con la estructura del átomo y describían la interacción de la radiación con el átomo en términos de “saltos cuánticos” producidos por la colisión de un *quantum* con uno de los electrones del átomo o por la emisión espontánea de un *quantum* por decaimiento electrónico del átomo (Bohr, 1913).

A pesar del ingenio puesto en los postulados y de la eficacia y elegancia de las explicaciones logradas, el desparpajo de la renuncia a “los principios que hemos llegado a admitir sin discusión” demoró su aceptación por la comunidad científica de esa época. Como se dijo antes, el mismo Planck no estaba convencido de los *quanta*. Robert Millikan, premio Nobel de física de 1923, tildó el artículo de Einstein sobre el efecto fotoeléctrico de “hipótesis atrevida, por no llamarla insensata”. Finalmente, la teoría ondulatoria de la materia desarrollada por de Broglie, que aportó un marco teórico axiomático a los postulados de Bohr y fue galardonada con premio Nobel de física, fue refutada por Bohr mismo.

El tono de las confrontaciones, que llegó a ser melodramático, como en el enfrentamiento entre Heisenberg y Erwin Schrödinger (Cassidy, 1992), reflejó la incomodidad por el reto de comprender la naturaleza de las partículas y las ondas desde la perspectiva abierta por la ruptura de la física. Hasta el siglo 19, las esencias de esos dos tipos de objetos físicos se concebían mutuamente excluyentes, de modo que la onda podía caracterizarse como el objeto físico que *no es* una partícula, entendiendo que las partículas son entidades discretas, esto es discontinuas, e impenetrables, de manera que son contables, localizables en el espacio-tiempo, se mueven a lo largo de trayectorias y cuando se encuentran en un punto del espacio-tiempo, están obligadas a colisionar, cambiando su estado de movimiento. Las ondas, por el contrario, pueden superponerse en regiones extendidas del espacio-tiempo, sin que por ello estén obligadas a interactuar, pero, cuando lo hacen, su interacción se llama interferencia y, al abandonar la zona de interacción, continúan propagándose sin alteración por la interferencia.

Sin embargo, tanto la radiación como la materia parecían comportarse o bien como ondas o bien como partículas, porque para ambas se habían observado experimentalmente tanto las colisiones como la interferencia. Así, la noción de *dualidad onda-partícula* fue también un sello de época, a pesar de lo incómoda que resulta desde una perspectiva epistemológica, pues viola el principio de no-contradicción lógica, que establece que no se puede ser y no ser al tiempo. Bohr propuso una cierta reconciliación desplazando la exclusión mutua de ondas y partículas a los contextos experimentales: en un experimento específico, un objeto físico solo puede comportarse como onda o como partícula. Así, estos términos dejaron de denominar esencias de objetos físicos para nombrar estados o circunstancias contextuales.

Con todo, el convencimiento no fue unánime. En 1965, el mismo año en que recibió el premio Nobel de física, Richard Feynman afirmó que la interferencia de electrones es “un fenómeno imposible de explicar clásicamente y contiene el corazón de la Mecánica Cuántica. Realmente, contiene el único misterio de la Mecánica Cuántica” (Feynman et al, 1965). Pero la interferencia de partículas no es el único “misterio” con raíces en la edad dorada de la Mecánica Cuántica. También lo es, por ejemplo, el *salto cuántico* de los electrones orbitales en los átomos, mediante el cual el electrón literalmente desaparece de una órbita al tiempo que aparece en otra, debido a que cada órbita está asociada a un valor de la energía del electrón.

Es probable que se haya tenido la expectativa de que, una vez formalizada la Mecánica Cuántica con la publicación del artículo de Heisenberg en 1925, seguido de la publicación de cuatro artículos de Schrödinger (Schrödinger, 1926 a-d) con una formulación matemática alternativa pero equivalente, las rupturas se estabilizaran y la nueva teoría comenzara su desarrollo de manera armónica. Sin embargo, no fue así. La equivalencia matemática de los formulismos de Heisenberg y Schrödinger no trajo acuerdo sobre la fenomenología cuántica entre sus autores. El enfrentamiento de Schrödinger y su concepción ondulatoria con la denominada Escuela de Copenhague, a la que pertenecía Heisenberg (él difundió

el término "Der Kopenhagener Geist" - El Espíritu de Copenhague - para referirse de manera más filosófica a los aportes del grupo de su tutor Niels Bohr), y su concepción corpuscular se mantuvo hasta la muerte de Schrödinger en 1961.

También se mantuvo un largo enfrentamiento de Einstein con la misma Escuela de Copenhague, que tuvo un clímax con el artículo de 1935 publicado por Einstein y sus colaboradores Podolsky y Rosen. En este documento argumentaron que la Mecánica Cuántica no podía considerarse una teoría cuántica completa porque precedía como natural lo que hoy conocemos como *entrelazamiento* de sistemas cuánticos y, ellos lo consideraban un comportamiento contra natura (**Einstein et al**, 1935). Tal discusión, sin posible verificación experimental en la época, condujo a una interpretación en términos de "variables ocultas" (**Bohm**, 1952 a, b). La factibilidad experimental del entrelazamiento cuántico y la refutación de la interpretación basada en variables ocultas fue demostrada años después de la muerte de Einstein (**Aspect et al**, 1982). A pesar de que hoy no se haya alcanzado todavía su comprensión fenomenológica completa, el entrelazamiento cuántico constituye un aspecto fundamental del desarrollo tecnológico de la computación, las telecomunicaciones y la interacción no-lineal de los materiales con la radiación a escala de nano-tecnología.

La elegancia y aceptación generalizada del aparato matemático de la Mecánica Cuántica y su eficacia predictiva contrastan con las limitaciones fenomenológicas de la teoría, hasta el punto de que a mediados del siglo 20 se popularizó el refrán "*Shut up and calculate!*" (¡Cállate y calcula!). Quizá la aplicación más importante de la Mecánica Cuántica sea, todavía en la actualidad, el cálculo de densidades de probabilidad de fenómenos físicos en el espacio de Hilbert, a pesar de reclamos de experimentalistas como Asher Peres: "Los fenómenos cuánticos no ocurren en el espacio de Hilbert. Ocurren en un laboratorio" (**Peres**, 2010). De todas maneras, el papel actual de las matemáticas en Mecánica Cuántica se acerca más a la percepción Galileana, como lo expresó Lorenzo de la Torre, profesor de la Universidad de Antioquia: "Las matemáticas se utilizan sistemáticamente en la construcción de contextos para problemas físicos. De esta manera, vemos que las matemáticas son esenciales para la existencia misma de muchas partículas elementales y, en general, son una condición indispensable de la realidad física" (**De la Torre**, 1997).

La vigencia actual de la ruptura causada por la Mecánica Cuántica quedó manifiesta dramáticamente en una encuesta realizada este año por *Nature* alrededor del mundo, cuyos resultados se publicaron hace pocas semanas (**Gibney**, 2025). Dos resultados fueron de particular interés. El primero se refiere a la indagación sobre las explicaciones preferidas de la Mecánica Cuántica. Los resultados revelaron que apenas el 36% de 1.101 encuestados se acoge a la interpretación de Copenhague, mientras que el 64% restante se distribuye en 10 opciones interpretativas, en poblaciones que no superan el 10% en ocho de ellas y son de 15% y 17% en las otras dos. Aunque la muestra no necesariamente es representativa de la comunidad científica, el resultado parece sugerir un fenómeno similar al relatado en el mito bíblico de la torre de Babel: los físicos no han logrado acuerdo sobre la visión del mundo que puede construirse con base en la Mecánica Cuántica, a pesar de la precisión predictiva de sus cálculos. El segundo atañe al reconocimiento de la frontera entre objetos clásicos y cuánticos. En este caso el 45% de los 1.018 encuestados reconoce la frontera, pero el 40% la califica de no-nítida. Otro 45% declara que no hay frontera y el 10% restante se manifiesta inseguro de su existencia. Una vez más, la muestra no necesariamente es representativa de la comunidad científica, pero el resultado es inesperado: los encuestados no parecen percibir la historia de ruptura dramática de la Mecánica Cuántica, considerándola más bien como una evolución natural del conocimiento científico, armónica con el legado del siglo 19. La última palabra al respecto no parece haber sido dicha todavía.

El recorrido anterior sugiere que la conmemoración convocada por la Asamblea General de la ONU para este año es realmente la celebración de una profunda ruptura en el pensamiento humano que aún permanece vigente.

Román Castañeda

Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Colombia
rcastane@unal.edu.co

Referencias

- Aspect, A., Dalibard, J., and Roger, G.** (1982). Experimental test of Bell's Inequalities using Time-Varying Analyzers. *Phys. Rev. Let.* 49, 1804-1807.
- Bohm, D.** (1952). A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of "Hidden" Variables I. *Phys. Rev.* 85, 166-179.
- Bohm, D.** (1952). A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of "Hidden" Variables II. *Phys. Rev.* 85, 180-193.
- Bohr, N.** (1913). On the Constitution of Atoms and Molecules. *Philosophical Magazine* 26, 476 (25 p).
- Boltzmann, L.** (1896). Vorlesungen über Gastheorie (Leipzig: Johann Ambrosius Barth Collection).
- Cassidy, D.C.** (1992). Werner Heisenberg und das Unbestimmtheitsprinzip. *Spektrum der Wissenschaft*, Juli 1992, 92-99.
- De Broglie, L.** (1925). Recherches sur la théorie des quanta (Ann.de Phys., 10^e série, t. III, Janvier-Février).
- De Broglie, L.** (1956). Nouvelles Perspectives en Microphysique (Paris: Albin Michel).
- De la Torre, L.** (1997). Math is key to identifying source of 'strange foot-print. *Physics Today*, September, p. 15.
- Einstein, A.** (1905). Zur Elektrodynamik bewegter Körper. *Annalen der Physik* 17, 891-921.
- Einstein, A.** (1905). Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. *Annalen der Physik* 17, 132-148.
- Einstein, A.** (1916). Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie. *Ann. Phys.* 49, 769-822.
- Einstein, A., Podolsky, B., and Rosen, N.** (1935). Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Phys. Rev.* 47, 777-780.
- Eisberg, R.** (1978). Fundamentos de Física Moderna (México: Limusa).
- Feynman, R., Leighton, R., and Sands, M.** (1965). The Feynman Lectures on Physics (Menlo Park: Addison-Wesley).
- Fresnel, A.** (1826). Mémoire sur la diffraction de la lumière. *Mémoires de l'Académie des Sciences*, vol.V: 339-475.
- Galilei, G.** (1623). Il Saggiatore (Editio Princeps, Roma: Giacomo Mascardi).
- Gibney, E.** (2025). Physicists disagree wildly on what quantum mechanics says about reality, *Nature* survey shows. *Nature*. <https://www.nature.com/articles/d41586-025-02342-y>
- Heisenberg, W.** (1925). Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen. *Z. Physik* 33, 879-893.
- Maxwell, J. C.** (1865). A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 155, 459-512.
- Newton, I.** (1686). Philosophiae naturalis principia mathematica (London: S. Pepys Imprimatur).
- Peres, Asher** (2010). Quantum theory concepts and methods (Springer).
- Schrödinger, E.** (1926). Quantisierung als Eigenwertproblem I. *Ann. Phys.* 79, 361-376.
- Schrödinger, E.** (1926). Quantisierung als Eigenwertproblem II. *Annalen der Physik* 79, 489-527.
- Schrödinger, E.** (1926). Quantisierung als Eigenwertproblem III. *Annalen der Physik* 80, 437-490.
- Schrödinger, E.** (1926). Quantisierung als Eigenwertproblem IV. *Annalen der Physik* 81, 109-139.