

Einstein y la revolución científica del siglo XX

Luis Enrique OTERO CARVAJAL

Universidad Complutense de Madrid
leoc@ya.com

RESUMEN

En 1905 un joven desconocido llamado Albert Einstein publicó cinco artículos que cambiaron la física. La teoría de la relatividad destruyó el espacio y tiempo absolutos que habían caracterizado a la física moderna desde los tiempos de Newton. La relatividad general sustituyó a la cosmología moderna, el universo estático e infinito fue reemplazado por el universo finito y en expansión de la teoría del Big bang. La mecánica cuántica eliminó el principio de causalidad estricto sobre el que se había afirmado la representación determinista de la Naturaleza. La revolución científica del siglo XX cambió nuestra representación de la Naturaleza y los presupuestos epistemológicos sobre los que se asentaba la Razón moderna de la civilización occidental. Einstein desempeñó un papel protagonista en dicha revolución, aunque el carácter probabilista de la teoría cuántica, a la que había realizado contribuciones esenciales, le desagradó profundamente.

Palabras clave: Einstein. Relatividad. Teoría cuántica. Mecánica cuántica. Revolución científica.

Einstein and the Scientific Revolution of the 20th Century.

ABSTRACT

In 1905 an unknown young man called Albert Einstein published five articles that they changed the Physics. The Relativity Theory demolished the absolute space and time that they had been characteristic of the Modern Physics from the times of Newton. The General Relativity replaced the Modern Cosmology, the static and infinite universe that it was replaced by the finite universe and in expansion of the Big Bang Theory. The Quantum Theory eliminated the strict principle of causality that it was the foundation of the deterministic representation of the Nature. The Scientific Revolution of the 20th century changed our representation of the Nature and the epistemological premises in which the modern Reason of the Western Civilization was laid down. Einstein performed a leading role in that Revolution, although the probabilistic character of the quantum theory displeased him deeply, even though he had contributed essential inputs to it.

Key Words: Einstein. Relativity. Quantum Theory. Quantum Mechanics. Scientific Revolution.

Texto de la conferencia pronunciada en el Congreso Internacional: *Einstein. Centenario del año maravilloso de 1905*. Dentro de la celebración del Año Internacional de la Física.

Organizado por el Departamento de Ciencias Físicas de la Universidad de Puerto Rico (Recinto de Entre Ríos) con la colaboración de la *American Physical Society* (APS), 29-31 de marzo de 2005, San Juan de Puerto Rico.

A comienzos del siglo XIX el imperio de la Razón brillaba en todo su esplendor y, dentro del mismo, la representación determinista de la Naturaleza ocupaba un papel central, en virtud de la potencia y el vigor de los resultados de la visión mecanicista de la Naturaleza fundamentada en los enormes éxitos del sistema newtoniano¹. De hecho la aparición de la teoría evolucionista de Darwin fue interpretada como la culminación de dicha representación, como afirmó el gran físico vienés Ludwig Boltzmann el 29 de mayo de 1886: «Si ustedes me preguntan por mi convicción más íntima, sobre si nuestra época se conocerá como siglo del acero, o siglo de la electricidad, o del vapor, les contestaré sin dudar que será llamado el siglo de la visión mecánica de la naturaleza, el siglo de Darwin»².

Sin embargo, el desarrollo de la teoría electromagnética durante la segunda mitad del siglo XIX comenzó a crear problemas a una representación exclusivamente mecanicista de los fenómenos físicos. A la altura de 1850 las dificultades para explicar los fenómenos eléctricos y magnéticos de una forma satisfactoria persistían, hasta el punto de que «no se puede decir que existiese un acuerdo generalizado ni siquiera en cuáles deberían de ser los principios teóricos adecuados para poder desarrollar una electrodinámica»³. Con la llegada de James Clerk Maxwell la situación cambió radicalmente, inspirándose en los trabajos de Michael Faraday, estableció la teoría unificada de los fenómenos eléctricos y magnéticos, para lo cual postuló la existencia del éter, que ocupando todo el espacio, constituiría el medio en el que se desarrollarían los fenómenos electromagnéticos⁴.

En un principio Maxwell se apoyó en la imagen «cartesiana» del mundo, donde el medio omnipresente obedece las leyes de la mecánica de Newton... Y señaló, aunque no muy convincentemente, que su teoría podía deducirse a partir de los experimentos de

¹ OTERO CARVAJAL, Luis Enrique: *La crisis de la Modernidad. La quiebra de la representación determinista*. Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid, 1988, cap. I. Otero Carvajal: «De Darwin a Einstein», en BAHAMONDE MAGRO, Ángel (coord.): *La era del imperialismo*, volumen XI de la *Historia Universal Planeta* dirigida por Josep FONTANA, Barcelona, Planeta, 1992, pp. 281-303.

² BOLTZMANN, Ludwig: «La segunda ley de la teoría mecánica del calor», en, BOLTZMANN, L.: *Escritos de mecánica y termodinámica*, Madrid, Alianza, 1986, p. 59.

³ SÁNCHEZ RON, José Manuel: *El origen y desarrollo de la relatividad*, Madrid, Alianza, 1985, pp. 20-21.

⁴ MAXWELL, James Clerk: «On Physical Lines of Force», *Scientific Papers*, 1861-62.

Faraday. Maxwell abogó también por sus ecuaciones señalando que son consistentes con la hipótesis de un mecanismo... [mediante] una «ilustración dinámica» del mecanismo de la inducción electromagnética... Las consecuencias de este argumento no fueron precisamente las que Maxwell buscaba... La teoría expuesta en el artículo no *depende* realmente de la hipótesis de un mecanismo newtoniano. En lugar de ser el primer paso hacia la consecución de una teoría mecánica, resultó ser el primero en el sentido opuesto.⁵

Conforme la teoría electromagnética se iba imponiendo en los círculos científicos durante el último tercio del siglo XIX, surgieron voces que reclamaban una revisión de los fundamentos de la Física clásica⁶. Dos fueron las corrientes que sobresalieron en este período: el *sensacionismo* de Ernst Mach, cuyas posiciones se acercaban bastante a una fenomenología de la ciencia⁷, y el *energetismo*, cuyo máximo exponente fue el químico William Ostwald⁸. Ambas corrientes se enfrentaron con empeño a la representación mecanicista de la Naturaleza y, en particular, a las hipótesis atomísticas. Los *fenomenistas* rechazaban toda hipótesis que no se fundamentara directamente en la experiencia, eran, por tanto, defensores de un positivismo extremo, de ahí la influencia que ejerció Ernst Mach en los fundadores del Círculo de Viena y del neopositivismo⁹. El *energetismo* trataba de construir una concepción metateórica que liberara a la ciencia de su dependencia respecto de la Física, mediante el desarrollo de una ciencia superior, la *energética*, que unificara en ella el resto de las ciencias¹⁰.

En el campo de la física esta crisis de los fundamentos se manifestó en científicos de la talla y el renombre de Ernst Mach, Gustav Kirchhoff, Hermann von

⁵ BERKSON, William: *Las teorías de los campos de fuerza. Desde Faraday hasta Einstein*, Madrid, Alianza, 1981, pp. 220-221.

⁶ Sobre el periodo comprendido entre 1873, año de la publicación del *Treatise* de Maxwell, y la aparición del artículo de LORENTZ, Hendrik Antoon: «La théorie électromagnétique de Maxwell et son application aux cours mouvements» en 1892 ver: BERKSON, William: *Las teorías de los campos de fuerza...*, *op. cit.*, pp. 224-343; WHITTAKER, Edmund Taylor: *A History of the Theories of Aether and Electricity. I: The classical Theories*. ed. revisada y aumentada vol. I, 1951, vol. II, 1953, Thomas Nelson & Sons, London; Harper Torchbook Paperback, New York, 1953, reimpresso en 1973 en New York, Humanities Press, 1973; SÁNCHEZ RON, José Manuel: *El origen y desarrollo de la relatividad*, Madrid, Alianza, 1985, pp. 20-54. OTERO CARVAJAL, Luis Enrique: *La crisis de la Modernidad. La quiebra de la representación determinista*, cap. I.

⁷ MACH, Ernst: *Die Analyse der Empfindungen*. 6ª ed., Jena 1911. MACH, Ernst: *Popular-wissenschaftliche Vorlesungen*. 4ª ed. Leipzig, 1910. MACH, Ernst: *Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch kritisch dargestellt* (de esta última existe traducción al castellano *El desarrollo histórico-crítico de la mecánica*, Madrid, Espasa Calpe, 1947). BOUVIER, Robert: *La pensée de Ernst Mach. Essai de biographie intellectuelle et de critique*. París, 1923.

⁸ OSTWALD, William: *Die Energie*, Leipzig, Akademie Verlag, 1908; *Der Energetische Imperativ*, Leipzig, Akademie Verlag, 1922. OTERO CARVAJAL, Luis Enrique: *La crisis de la Modernidad. La quiebra de la representación determinista*, cap. I y cap. II.

⁹ JANIK, Allan y TOULMIN, Stephen: *La Viena de Wittgenstein*. Madrid, Taurus, 1983, 1ª ed. castellano 1974, 1ª ed. inglés 1973.

¹⁰ BOLTZMANN, Ludwig: «Sobre la evolución de los métodos de la física teórica en los tiempos recientes», conferencia pronunciada ante la Asamblea de Investigadores en Ciencias de la Naturaleza, celebrada en Munich el 22 de septiembre de 1899, en: BOLTZMANN, Ludwig: *Escritos de mecánica y termodinámica*, Madrid, Alianza, 1986.

Helmholtz, Heinrich Hertz y Ludwing Boltzmann¹¹. La obra de Mach enraizaba en una amplia tradición, que en el último tercio del siglo había arrastrado a una parte de la intelectualidad alemana¹². En más de una ocasión puso de manifiesto el propio Einstein que la lectura de las obras de Mach, especialmente *El desarrollo histórico-crítico de la Mecánica*, desempeñaron un notable influjo en su juventud. En esos años la posición epistemológica de Einstein podría ser considerada como la de un empirista, influenciado por Mach y Hume¹³. Einstein fue mostrándose cada vez más crítico respecto de los presupuestos epistemológicos y de la filosofía de la ciencia de Mach¹⁴.

La Teoría Especial de la Relatividad

Las razones que movieron a Einstein para elaborar su famoso artículo de 1905 «*Sobre la electrodinámica de cuerpos en movimiento*»¹⁵ en el que desarrolló la Teoría Especial de la Relatividad no fueron esencialmente de carácter experimental¹⁶. «Poco a poco fui desesperando de poder descubrir las leyes verdaderas

¹¹ BOLTZMANN, Ludwig: «Una consideración matemática sobre la energética», *Annalen der Physik und Chemie*, 57, 1896, p. 39 y ss., reproducida en BOLTZMANN, Ludwig: *Escritos de mecánica y termodinámica*, op. cit., pp. 93-94.

¹² JANIK, Allan y TOULMIN, Stephen: *La Viena de Wittgenstein*. Madrid, Taurus, 1983, pp. 166-167. Ver también GARGANI, Aldo (ed.): *Crisis de la razón. Nuevos modelos en la relación entre saber y actividad humana*, Madrid, Siglo XXI, 1983, pp. 7-53. CACCIARI, Massimo: *Krisis. Ensayo sobre la crisis del pensamiento negativo de Nietzsche a Wittgenstein*, Madrid, Siglo XXI, 1982.

¹³ EINSTEIN, Albert: *Notas Autobiográficas*, Madrid, Alianza, 1984, p. 53. y pp. 24-25.

¹⁴ HOLTON, Gerald: «Mach, Einstein y la búsqueda de la realidad» en *Daedalus*, primavera de 1968, pp. 636-673, reproducido en HOLTON, Gerald: *Ensayos sobre el pensamiento científico en la época de Einstein*, Alianza, Madrid, 1978, pp. 164-203. OTERO CARVAJAL, Luis Enrique: *La crisis de la Modernidad. La quiebra de la representación determinista*, cap. III. A. Einstein, carta dirigida a Michele Besso el 29 de Abril de 1917, reproducida en *Albert Einstein correspondencia con Michele Besso. (1903-1955)*, ed. de SPEZIALI, Pierre, Barcelona, Tusquets, 1994, pp. 148-149. Sobre su concepción de la ciencia volvió en repetidas ocasiones, como en: Albert Einstein: «Bertrand Russell y el pensamiento filosófico», en el vol. V de la colección *Library of Living Philosophes* editado por A. Schilp en 1946 dedicado a la filosofía de Bertrand Russell, reproducido en castellano en EINSTEIN, Albert: *Mi visión del mundo*, recopilación de textos a cargo de Carl Seeling, Tusquets, Barcelona, 1981, p. 50.

¹⁵ EINSTEIN, Albert: «Zur elektrodynamik bewegter körper» en *Annalen der Physik*, vol. XVII, 1905, pp. 891-921. EINSTEIN, Albert: *Cien años de relatividad. Los artículos clave de Albert Einstein de 1905 y 1906*, trad. Antonio Ruiz de Elvira. Madrid, Nivola, 2004, pp. 88-139, y STACHEL, John (ed.): *Einstein 1905: un año milagroso. Cinco artículos que cambiaron la física*. Barcelona, Crítica, 2001, pp. 111-143. «Solamente se podrá decidir con certeza si existe un error sistemático insospechado o si los fundamentos de la teoría de la relatividad no se corresponden con los hechos, cuando se disponga de una gran variedad de observaciones» Einstein, Albert: «Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen», *Jahrbuch der Radioaktivität und Electronik*, 4, 1907, p. 439.

¹⁶ Sobre este tema ver: HIROSIGE, T.: «The Ether Problem, the Mechanistic Worldview, and the Origins of the Theory of Relativity» en *Historical Studies in the Physical Sciences*, vol. VII, 1976, pp. 3-82. Igualmente Gerald Holton se refiere al tema en su artículo «Einstein, Michelson y el experimento "crucial"», publicado originalmente en *Isis*, vol. 60, 1969, pp. 133-197 y recopilado posteriormente

mediante esfuerzos constructivos basados en hechos conocidos. Cuanto más porfiaba y más denodado era mi empeño, tanto más me convencía de que solamente el descubrimiento de un principio formal y general podía llevarnos a resultados seguros»¹⁷. En dicho artículo Einstein señaló los motivos que le llevaron a escribirlo:

Ejemplos de este tipo [se refiere a algunos ejemplos esbozados en el párrafo anterior, referidos a la acción electrodinámica recíproca de un imán y un conductor], junto con los infructuosos intentos de detectar un movimiento de la Tierra con relación al «medio lumínico», llevan a la conjetura de que ni los fenómenos de la mecánica, ni tampoco los de la electrodinámica tienen propiedades que correspondan al concepto de reposo absoluto. Más bien, las mismas leyes de la electrodinámica y la óptica serán válidas [en la reimpresión de 1913 se añadió una nota que decía: «Lo que esto significa es, 'serán válidas en primera aproximación'»] para todos los sistemas de coordenadas en los que rigen las ecuaciones de la mecánica, como ya se ha demostrado para cantidades de primer orden. Elevaremos esta conjetura (cuyo contenido será denominado en adelante «el principio de relatividad») al estatus de un postulado e introduciremos también otro postulado, que es sólo aparentemente incompatible con él, a saber, que la luz se propaga siempre en el espacio vacío con una velocidad definida $V [c]$ que es independiente del estado de movimiento del cuerpo emisor. Estos dos postulados bastan para conseguir una electrodinámica de los cuerpos en movimiento simple y consistente basada en la teoría de Maxwell para cuerpos en reposo. La introducción de un «éter lumínico» se mostrará superflua, puesto que la idea que se va a desarrollar aquí no requerirá un «espacio en reposo absoluto» dotado de propiedades especiales, ni asigna un vector velocidad a un punto del espacio vacío donde están teniendo lugar procesos electromagnéticos.¹⁸

Para facilitar la comprensión de la Teoría Especial de la Relatividad, y que ésta se abriera camino en el mundo de la física, el propio Einstein acudió *a posteriori* a los resultados negativos del experimento de Michelson-Morley en respaldo de su teoría¹⁹. «La teoría especial de la relatividad debe su creación a las ecuaciones de Maxwell del campo electromagnético. Y a la inversa: estas últimas no son captadas formalmente de modo satisfactorio sino a través de la teoría especial de la relatividad»²⁰.

en HOLTON, Gerald: *Ensayos sobre el pensamiento científico en la época de Einstein*, Alianza Editorial, Madrid, 1973, reimp. 1978, pp. 204-293, en dicho artículo el autor mantiene que Einstein no se vio empujado por la necesidad de explicar el experimento de Michelson-Morley a la hora de elaborar la Teoría Especial de la Relatividad. Ver también SÁNCHEZ RON, José Manuel: *El origen y desarrollo de la Relatividad*, op. cit., pp. 61-66.

¹⁷ EINSTEIN, Albert: *Notas Autobiográficas*. Madrid, Alianza, 1984, p. 51.

¹⁸ EINSTEIN, Albert: «Sobre la electrodinámica de cuerpos en movimiento», en STACHEL, John (ed.): *Einstein 1905: un año milagroso. Cinco artículos que cambiaron la física*, Barcelona, Crítica, 2001, pp. 111-112.

¹⁹ EINSTEIN, Albert: *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie*, Braunschweig, Friedrich Vieweg & Son, 1917. Existe traducción al castellano en WILLIAMS, L. Pearce. (ed.): *La teoría de la relatividad: sus orígenes e impacto sobre el pensamiento moderno*, Madrid, Alianza, 1983, pp. 71-92. SANKLAND, R. S.: «Michelson-Morley Experiment», en *American Journal of Physics* y «Michelson-Morley Experiment», en *Scientific American*, 211, nº 5, 1964, p. 107.

²⁰ EINSTEIN, Albert: *Notas Autobiográficas*, op. cit., p. 60.

La Teoría de la Relatividad Especial recurre al espacio cuadrimensional de Minkowski como la manera de representar «nuestro mundo cotidiano», mediante la inclusión de una cuarta coordenada: el «tiempo». La argumentación de Einstein proseguía con el análisis de la ley de inercia de la física newtoniana, señalando que ésta sólo era aplicable a los sistemas de coordenadas de Galileo y no constituía, por tanto, una ley de aplicación universal, como sostenía la Mecánica clásica²¹. Einstein formuló de manera explícita el principio de relatividad de Galileo, aclarando, además, que las leyes generales de la mecánica clásica son exactas exclusivamente en el marco de referencia del sistema de coordenadas galileano. «Mientras se mantuvo la creencia de que todos los fenómenos naturales se podían representar con ayuda de la Mecánica clásica, no se podía dudar de la validez de este principio de relatividad. Sin embargo, los recientes adelantos de la Electrodinámica y de la Óptica hicieron ver cada vez más claramente que la Mecánica clásica, como base de toda descripción física de la naturaleza, no era suficiente...»²².

El análisis de los conceptos de «espacio» y «tiempo» llevaron a Einstein a reformular el concepto de «simultaneidad»: «Sucesos que son simultáneos respecto al terraplén no lo son respecto al tren, y viceversa (relatividad de la simultaneidad). Cada cuerpo de referencia (sistema de coordenadas) tiene su tiempo especial; una localización temporal tiene sólo sentido cuando se indica el cuerpo de referencia al que remite»²³. Por tanto, el concepto de «tiempo» en física sólo puede ser relativo, es decir, referido al «sistema de coordenadas» en el que se produce la localización temporal, desapareció así el *tiempo absoluto* característico de la física moderna. «Antes de la teoría de la relatividad, la Física suponía siempre implícitamente que el significado de los datos temporales era absoluto, es decir, independiente del estado de movimiento del cuerpo de referencia. Pero acabamos de ver que este supuesto es incompatible con la definición natural de simultaneidad; si prescindimos de él desaparece el conflicto, ..., entre la ley de propagación de la luz y el principio de la relatividad»²⁴.

Siguiendo un razonamiento similar Einstein llegó a la conclusión de que no era defendible ni aplicable el concepto de «espacio absoluto» en física: «... en la física de Newton era imprescindible la noción del espacio absoluto, en el sentido de Descartes... La aceleración de Newton sólo se puede concebir, es decir definir, mediante el espacio absoluto.»²⁵ El concepto de *distancia espacial* entre dos puntos de un cuerpo rígido se encuentra definido en función del sistema de refe-

²¹ EINSTEIN, Albert: *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*, Madrid, Alianza, 1984, p. 18.

²² Idem.

²³ Ibidem, p. 28.

²⁴ Idem.

²⁵ EINSTEIN, Albert: «El problema del espacio, del éter y del campo en la física», *Mein Weltbild*, Amsterdam: Querido Verlag, 1934, versión en castellano EINSTEIN, Albert: *Mi visión del mundo*, Barcelona, Tusquets, 1981, p. 192.

rencia, por lo que el concepto de «espacio» en física sólo puede ser empleado en este sentido²⁶.

... había que hacer de nuevo una elección similar y desesperada: para extender el principio de relatividad desde la mecánica (donde había funcionado) a la totalidad de la física, y explicar al mismo tiempo los resultados negativos de todos los experimentos ópticos y eléctricos sobre la corriente del éter, uno «solamente» necesitaba abandonar la noción de marco absoluto de referencia y, con ella el éter. Pero sin éstas el paisaje familiar cambiaba súbita y radicalmente en todos los detalles. La física se quedaba sin su vieja esperanza, satisfecha ya en parte, y en algunas ocasiones satisfactoriamente, consistente en explicar todos los fenómenos por medio de una teoría mecanicista y consistente.²⁷

El desarrollo de la electrodinámica por parte de Lorentz alcanzó los límites permisibles dentro de los presupuestos de la física clásica, avanzar más allá era imposible mientras no se eliminase el éter y, con él, la existencia de marcos de referencia privilegiados, «si al éter no le corresponde ningún estado de movimiento no hay ningún motivo para introducirlo junto al espacio como si fuera un ente de naturaleza especial. Sin embargo, los físicos no asumían esta forma o manera de pensar... Entonces llegó la teoría de la relatividad especial con el descubrimiento de la igualdad física de todos los sistemas inerciales.»²⁸

Para Einstein todos los sistemas de referencia que se encuentran en movimiento con una velocidad relativa constante respecto de un sistema inercial determinado son equivalentes, y ninguno ostenta una posición de privilegio. De esta forma, las *ecuaciones de transformación de Lorentz* se convierten en *ecuaciones de transformación relativista*, que permiten que la información procedente de un sistema inercial de referencia sea traducida en información válida para otro sistema. La aplicación de «relojes sincronizados» y de «reglas rígidas» en dos sistemas de referencia k (en reposo respecto del sistema k') y k' (en movimiento uniforme respecto de k), conducen, conforme se aplican las ecuaciones de transformación de Lorentz, a la constatación de que: «... La regla rígida en movimiento [en k'] es más corta que la misma regla cuando está en estado de reposo, y es tanto más corta cuando más rápidamente se mueva... Si hubiésemos tomado

²⁶ EINSTEIN, Albert: *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*, op. cit., p. 31. EINSTEIN, Albert: «H. A. Lorentz, creador y personalidad». Mensaje pronunciado en Leyden, Holanda, 1953, en la conmemoración del centenario del nacimiento de Lorentz. Publicado en *Mein Weltbild*, Zurich, Europa Verlag, 1953, edición en castellano: *Mis ideas y opiniones*, Antoni Bosch, Barcelona, 1980, pp. 65-67, también en Sarpe, col. «Los grandes pensadores», vol. 3, *Sobre la teoría de la relatividad*, Madrid, 1983, p. 261-262.

²⁷ HOLTON, Gerald: «Einstein, Michelson y el experimento “crucial”» en *Ensayos sobre el pensamiento científico en la época de Einstein*, p. 264.

²⁸ EINSTEIN, Albert: «El problema del espacio, del éter y del campo en la física», *Mein Weltbild*, Amsterdam: Querido Verlag, 1934, versión en castellano EINSTEIN, Albert: *Mi visión del mundo*. Barcelona, Tusquets, 1981, pp. 193-194.

como base la transformación de Galileo, no habríamos obtenido un acortamiento de longitudes como consecuencia del movimiento.»²⁹

Otro tanto ocurre con la medición del tiempo, como consecuencia del movimiento de sistema de referencia k' «el reloj marcha algo más despacio que en estado de reposo. La velocidad de la luz c desempeña, también aquí, el papel de una velocidad límite inalcanzable»³⁰, mientras que en las ecuaciones de transformación de Galileo la medición del tiempo permanece inalterable. De aquí se deduce que el teorema de adición de velocidades no es el mismo para la física clásica que para la física relativista. Según Einstein el valor heurístico de la teoría de la relatividad se puede resumir, «... una vez en posesión de la transformación de Lorentz» y tomando en consideración el principio de relatividad, en: «Toda ley general de la naturaleza tiene que estar constituida de tal modo que se transforme en otra ley de idéntica estructura al introducir, en lugar de las variables espacio-temporales x, y, z, t del sistema de coordenadas original k , nuevas variables espacio-temporales x', y', z', t' de otro sistema de coordenadas k' , donde la relación matemática entre las cantidades con prima y sin prima viene dada por la transformación de Lorentz. Formulado brevemente: Las leyes generales de la naturaleza son covariantes respecto a la transformación de Lorentz.»³¹.

El impacto de la Teoría Especial de la Relatividad

La aparición de la teoría especial de la relatividad dio lugar a una profunda polémica entre los defensores ardientes de la nueva teoría y sus detractores, afeerrados a la visión clásica de la física; polémica que se prolongó durante años y que no culminó hasta avanzada la década de los veinte. En ella se esgrimieron desde argumentos estrictamente físicos hasta filosóficos, pasando por razones de carácter epistemológico, referentes a la nueva concepción que de las leyes de la mecánica proponía la teoría relativista. La aceptación de la Teoría Especial de la Relatividad por parte de los físicos no fue fácil, por cuanto significaba arrojar por la borda la imagen que del funcionamiento de la Naturaleza habían construido a partir de la Mecánica newtoniana. «La transición de un paradigma en crisis a otro nuevo del que pueda surgir una nueva tradición de ciencia normal, está lejos de ser un proceso de acumulación, al que se llegue por medio de una articulación o una ampliación del nuevo paradigma. Es más bien una reconstrucción del campo, a partir de nuevos fundamentos, reconstrucción que cambia algunas de las generalizaciones teóricas más elementales del campo, así como también muchos de los métodos y aplicaciones del paradigma... Cuando la transición [de un paradigma-

²⁹ EINSTEIN, Albert: *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*, op. cit., pp. 35-36.

³⁰ *Ibidem*, p. 37.

³¹ *Ibidem*, p. 41.

ma a otro] es completa, la profesión habrá modificado su visión del campo, sus métodos y sus metas.»³²

La recepción de la Teoría Especial de la relatividad, su aceptación o rechazo por parte de la comunidad científica, se encontró condicionada por las diferentes tradiciones científicas vigentes en cada país, mientras en determinados lugares la teoría de Einstein se abrió paso en los círculos académicos con mayor facilidad, caso de Alemania, en otros tropezó con mayores resistencias, caso del Reino Unido y Francia. Influyeron en ello el vigor de la crítica a la que anteriormente había estado sometida la mecánica clásica, en el caso alemán, que desbrozó el camino para la acogida de la teoría relativista; la pujanza de la visión clásica, en el caso británico lugar de origen de Newton y Maxwell; o incluso las dificultades de relación y comunicación entre las comunidades científicas de diferentes países, en este caso las dificultades provocadas por la ruptura de los canales de comunicación entre los alemanes y los británicos y franceses a raíz de la primera guerra mundial.

En Alemania la teoría einsteiniana fue ampliamente debatida en los círculos académicos a partir de 1909, contribuyendo numerosos e importantes físicos alemanes a su desarrollo posterior, destacaron en esta labor físicos de la talla de Max Planck, Max von Laue y Jakob Laub. El caso de Planck requiere una mención especial, catedrático en Berlín era uno de los editores de la revista *Annalen der Physik*, el lugar donde fue publicado originariamente el famoso artículo «*Zur Elektrodynamik bewegter Körper*». Planck se convirtió en uno de los principales defensores de la relatividad³³. Otra de las personas que contribuyó a la difusión de la teoría relativista, aunque de manera mucho más indirecta que Planck fue Wilhelm Wein, editor al igual que el anterior de la revista *Annalen der Physik*. Wein había manifestado su desacuerdo inicial con la relatividad y hasta 1909 no llegó a aceptarla; sin embargo, señaló a su discípulo Jakob Laub el interés de estudiarlo en profundidad. De esta forma, Laub entró en contacto con Einstein, fruto de lo cual publicaron tres artículos en colaboración en 1908 sobre la relatividad³⁴; importante fue el artículo que Laub escribió en 1910³⁵. Transcurrieron varios años antes de que se pudiese decir que había una opinión preponderante a su favor, incluso entre los científicos alemanes, el cambio de rumbo fue la publicación, en 1909, de la comunicación de Hermann Minkowski *Space and Time*³⁶.

³² KUHN, Thomas S.: *La estructura de las revoluciones científicas*, Madrid, Fondo de Cultura Económica, 1982, p. 139.

³³ SÁNCHEZ RON, José Manuel: *El origen y desarrollo de la relatividad*, op. cit., pp. 79-80.

³⁴ EINSTEIN, Albert y LAUB, Jakob: «Elektromagnetische Grundgleichungen für bewegte Körper», *Annalen der Physik*, 26, 1908, p. 532-540; EINSTEIN, Albert y LAUB, Jakob: «Die im elektromagnetischen Felde auf ruhende Körper ausgeübten ponderomotorischen Kräfte», *Annalen der Physik*, vol. 26, 1908, pp. 541-560; y Bermekungen zu unserer Arbeit: Elektromagnetische Grundgleichungen für bewegte Körper», *Annalen der Physik*, 28, 1908, p. 445-447.

³⁵ PYENSON, Lewis: *El joven Einstein*, Madrid, Alianza, 1990, pp.306-346.

³⁶ MINKOWSKI, Hermann: «Raum und Zeit», *Physikalische Zeitschrift*, reimpresso en H.A. LORENTZ et al.: *The Principle of Relativity*, London, Methuen & Co., 1923, p. 75-91. La conferencia *Espacio y Tiempo* fue pronunciada el 21 de septiembre de 1908 en la octava reunión de la Asamblea de Científicos de la Naturaleza y Médicos celebrada en Colonia. Anteriormente Minkowski había pronun-

La respuesta de los círculos científicos del Reino Unido, Francia y Estados Unidos fue en términos generales negativa, durante los primeros años para muchos físicos pasó inadvertida y, por tanto, ni siquiera produjo oposiciones. En el caso de Gran Bretaña³⁷, la recepción de la Relatividad fue bastante negativa, cuando la hubo. Las razones hay que buscarlas en la fuerza que la teoría del éter tenía entre los físicos británicos. En fecha tan tardía como 1909 J. J. Thomson, premio Nobel y uno de los físicos más respetados de la época en Gran Bretaña, mantenía, en su «*Presidential Address*» a la *British Association for the Advance of Science*, que: «El éter no es una creación fantástica del filósofo especulativo; es tan esencial para nosotros como el aire que respiramos... [Es el] asiento de las fuerzas eléctricas y magnéticas... [y el] banco en el que podemos depositar energía y extraerla según nos convenga.»³⁸

En Estados Unidos la Teoría Especial de la Relatividad pasó prácticamente desapercibida en los años siguientes a su publicación, y cuando no ocurrió tal cosa la respuesta fue en general bastante negativa. La opinión de W. F. Magie, profesor de física en la Universidad de Princeton, era representativa de la actitud de rechazo a la relatividad, en su «*Presidential Adress*» a la *American Association for the Advancement of Science* del 28 de diciembre de 1911, reflejó con claridad tal situación: «El desarrollo del principio de la relatividad nos impulsa hoy a examinar de nuevo los fundamentos de nuestro pensamiento en punto a estos dos conceptos primarios [espacio y tiempo]... El principio de la relatividad, en esta su forma metafísica, pretende ser capaz de abandonar la hipótesis de un éter... de lo cual se sigue que el rumbo filosófico consiste en abandonar por completo el concepto de éter..., pero me aventuro a decir que, en mi opinión, el abandono de la hipótesis de un éter en el momento presente constituye un importante y serio paso atrás en el desarrollo de la física especulativa...»³⁹. Incluso Michelson, cuyo experimento negativo sobre la corriente de éter fue posteriormente esgrimido como una de las pruebas experimentales confirmatorias de la Teoría Especial de la Relatividad, no llegó a aceptar completamente la teoría relativista, en sus *Estudios de Óptica*, proponía una «aceptación generosa» de la teoría de Einstein, aunque no sin reservas, «la existencia del éter parece ser inconsistente con la teoría», escribía: «Es de esperar que la teoría [se refiere a la teoría relativista] pueda ser reconciliada con la existencia de un medio, a través

ciado una conferencia titulada «*Das Relativitätsprinzip*» ante un público más restringido el 5 de noviembre de 1907, publicada seis años después de la muerte de Minkowski por Arnold Sommerfeld, en 1915. MINKOWSKI, Hermann: «*Das Relativitätsprinzip*», en *Annalen der Physik*, 47, 1915, p. 927-938.

³⁷ GOLBERG, S.: «In Defense of Ether: The British Response to Einstein's Theory of Relativity, 1905-1911», en *Hist. Stud. in the Phys. Sci.*, II, 1970, p. 89-125.

³⁸ THOMSON, Joseph John: *The Electrician*, 63, 1909, p. 778. SÁNCHEZ RON, José Manuel: *El origen y desarrollo de la relatividad*, op. cit., pp. 78-79.

³⁹ MAGIE, William F.: «The Primary Concepts of Physics», *Science*, Nueva Serie, vol. XXXV, enero-junio 1912, p. 281-293, existe un extracto de esta conferencia en WILLIAMS, L. Pearce (ed.): *La teoría de la relatividad; Sus orígenes e impacto sobre el pensamiento moderno*, pp. 129-132.

de una modificación de la teoría o, más probablemente, por medio de la atribución de las propiedades necesarias al éter.»⁴⁰

En Francia la situación no fue muy diferente. La Relatividad Especial se encontró mediatizada por el influjo de la figura de Henri Poincaré, en aquellos años la máxima autoridad de la física francesa sobre electrodinámica. Poincaré consideró durante muchos años que la teoría de Einstein no era sino un mero desarrollo de sus propias teorías y de la electrodinámica de Lorentz, en las que ya estaba contenido lo esencial que la relatividad especial de Einstein presentaba como novedoso⁴¹. La excepción la constituyó Paul Langevin, quien en 1906 habló ya sobre la relatividad en un curso del *Collège France*⁴². Sin embargo, la posición dominante entre los físicos franceses fue la representada por Henri Poincaré. El estallido de la Primera Guerra Mundial no ayudó a la difusión de la teoría de Einstein en Francia.

En España la recepción de la relatividad especial fue debida a tres de las figuras más destacadas de la física española de la primera mitad de siglo, Esteban Terradas, Blas Cabrera y José María Plans. En el Primer Congreso de la Asociación Española para el Progreso de las Ciencias, celebrado en Zaragoza en 1908, los dos primeros presentaron sendas comunicaciones en las que por primera vez se exponían en nuestro país los fundamentos de la teoría de Einstein⁴³, la actitud generalizada de los físicos españoles de la época se encontraba mejor representada por la postura negativa de J. Echeagaray, en 1912 escribía: «¡Cuántos capítulos de la vieja mecánica habría que modificar profundamente si se acepta-

⁴⁰ MICHELSON, Albert Abraham: *Studies in Optics*, Chicago, University of Chicago Press, 1927, p. 161.

⁴¹ De hecho, Poincaré nunca mencionó explícitamente a Einstein y su Teoría Especial de la Relatividad, en una de sus últimas obras *Ciencia y Método* escrita en 1909 no mencionó ni una sola vez el nombre de Einstein, aunque ya conocía su trabajo. Poincaré no comprendió la importancia y la relevancia del enfoque einsteiniano, su percepción del problema de la relatividad no sobrepasó el marco de la teoría electrodinámica de Lorentz, aunque mantuvo posiciones muy próximas a las de Einstein le faltó dar un enfoque más general al principio de relatividad.

⁴² BIEZUNSKI, Michel: «Einstein en París», en *Mundo científico*, n° 15, 1982, pp. 592-601 y su tesis de doctorado sobre la influencia y la recepción de Einstein en Francia, París, 1981. Ver también Langevin, P. y PATY, M.: «Le séjour d' Einstein en France en 1922», en *Fundamenta Scientiae*, n° 93, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 1979.

⁴³ TERRADAS, Esteban: «Teorías modernas acerca de la emisión de la luz», *Actas del Congreso de Zaragoza de la A.E.P.C.*, III, Madrid, 1908. CABRERA, Blas: «La teoría de los electrones y la constitución de la materia», *Actas del Congreso de Zaragoza de la A.E.P.C.*, Madrid, 1908. PLANS, José María: *Nociones fundamentales de la mecánica relativista*, Real Academia de Ciencias de Madrid, Madrid, 1921. GLICK, Thomas F.: *Einstein y los Españoles. Ciencia y Sociedad en la España de entre-guerras*, Alianza, Madrid, 1986; LAFUENTE, Antonio: «La relatividad y Einstein en España», *Mundo Científico*, n° 15, 1982; SÁNCHEZ RON, José Manuel: *Relatividad especial, relatividad general. 1905-1923. Orígenes, desarrollo y recepción por la comunidad científica*, Barcelona, Universidad Autónoma de Barcelona, 1981. OTERO CARVAJAL, Luis Enrique: «Madrid científico: relatividad y relativismo en España», en *Alfoz. Madrid, Territorio, Economía y Sociedad* n° 66-67, agosto-septiembre 1989, pp. 38-51.

se como buena esta última negación! [se refiere a la inexistencia del movimiento absoluto].»⁴⁴

Especial atención merece la opinión de H. A. Lorentz, su posición es especialmente valiosa pues la teoría de Einstein supuso un avance sustancial respecto de la electrodinámica de Maxwell-Lorentz. En su obra *The Theory of Electrons*⁴⁵ de 1909 reconocía el interés del enfoque de Einstein, pero no por ello renunciaba a su posición sobre el problema del éter. La posición de Lorentz respecto de la relatividad especial varió con el paso del tiempo, mereciéndole una opinión más favorable, en la segunda edición de su obra *The Theory of Electrons*, aparecida en 1915, incorporó una nota a pie de página en esta dirección, «Si tuviese que escribir ahora el último capítulo, sin duda que daría un lugar más prominente a la teoría de la relatividad de Einstein, en la que la teoría de los fenómenos electromagnéticos en sistemas en movimiento gana una simplicidad que yo no fui capaz de conseguir. La causa principal de mi fracaso estuvo en mi fijación en la idea de que sólo la variable t puede ser considerada como el tiempo verdadero y que mi tiempo local t' no debía considerarse más que como una cantidad matemática auxiliar.»⁴⁶ Lorentz puso el dedo en la llaga, al dejar al descubierto la distancia que separaba a sus planteamientos de 1899 de los de Einstein en 1905; atrapado como estaba por los principios de la física clásica no se le ocurrió que el tiempo local t' era un tiempo real y no un mero formalismo matemático. Era necesario una nueva visión de la física, y para ello era necesario romper con el pasado y plantear los problemas desde un ángulo diferente. Esta fue la hazaña de Einstein, de ahí su grandeza y las incomprensiones que encontró la nueva teoría, para abrirse paso en sus primeros años de vida. Quizá comprendamos mejor el cambio que significó la Teoría Especial de la Relatividad si recordamos las palabras Herbert Butterfield sobre la revolución copérnico-galileana: «Efectivamente, encontraremos que, tanto en la física celeste como en la terrestre -...-, los cambios fueron producidos, no por nuevas observaciones, ni por pruebas de carácter nuevo o inusitado, sino por las transposiciones que estaban teniendo lugar en las mentes de los propios hombres de ciencia. En relación con esto, es pertinente e importante notar que de todas las formas de actividad mental, la más difícil de inducir, incluso en las mentes jóvenes, de las que se podría suponer que no habían perdido todavía la flexibilidad, es el arte de manejar un conjunto determinado de datos ya conocidos, pero situándolos en un nuevo sistema de relaciones entre sí, en una nueva estructura, todo lo cual significa, virtualmente, ponerse por un momento a pensar según líneas nuevas.»⁴⁷ Esto es precisamente lo que hizo Einstein en 1905. «... la cuestión es que se originó [la

⁴⁴ ECHEGARAY, José: «Conferencias de Física Matemática», en *Revista de la Academia de Ciencias de Madrid*, nº 11, 1912, p. 367.

⁴⁵ LORENTZ, Hendrik A.: *The Theory of Electrons*, Dover, Nueva York, p. 229, citado en SÁNCHEZ RON, J. M.: *op. cit.*, pp. 93-94.

⁴⁶ LORENTZ, Hendrik A.: *The Theory of Electrons*, 2ª ed. 1915, nota 72, p. 321.

⁴⁷ BUTTERFIELD, Herbert: *Los orígenes de la ciencia moderna*, Madrid, Taurus, 1982, pp. 11-12.

relatividad] en los fallos de la teoría newtoniana, no surgió de sus éxitos, y el proceso que produjo la nueva física no fue un proceso de generalización, sino más bien un proceso de adopción de nuevas presuposiciones acerca de la estructura de la realidad física y de transformación de conceptos básicos con los que los científicos piensan y se relacionan con el mundo físico.»⁴⁸

El impacto filosófico de la Teoría Especial de la Relatividad

No es extraño pues que la Relatividad Especial llamará la atención de los filósofos. En muchos casos la nueva teoría fue mistificada, distorsionando su verdadero significado. La Relatividad Especial sirvió de cobertura para el desarrollo y argumentación de sistemas filosóficos divergentes entre sí, cuando no total y radicalmente contradictorios, la novedad de la nueva teoría facilitó esta situación. «Es evidente que cada escuela filosófica selecciona de la teoría de la relatividad aquellas conclusiones filosóficas que le parecen interesantes desde el punto de vista de sus intereses particulares y acepta, rechaza o “interpreta” la teoría física según que dicha teoría concuerde o no con las doctrinas de la escuela... Esto explica la sorprendente variedad de opiniones, las controversias violentas acerca de la importancia, consistencia y aplicaciones científicas de los descubrimientos de Einstein.»⁴⁹

El mismo Mach acogió inicialmente con satisfacción la relatividad especial en el convencimiento de que se trataba de una confirmación de sus críticas respecto de la física newtoniana, esta posición varió con el tiempo, alejándose progresivamente hasta su rechazo final aparecido en una obra póstuma en 1921⁵⁰. Petzoldt recibió con entusiasmo la teoría de Einstein, interpretándola como la confirmación desde la Física de los presupuestos filosóficos del neopositivismo⁵¹. Moritz Schlick fue uno de los primeros filósofos en aceptar las consecuencias epistemológicas y filosóficas de la teoría de la relatividad, para él constituía un ejercicio del análisis lógico trasladado al campo de la física. Su concepción de la teoría de Einstein descansaba sobre la base del convencionalismo de Poincaré, en su oposición al idealismo kantiano y en el empirismo filosófico⁵². Schlick ejerció una enorme influencia en la filosofía de los años veinte-treinta del siglo

⁴⁸ BROWN, Harold I.: *La nueva filosofía de la ciencia*, Madrid, Tecnos, p. 166.

⁴⁹ REICHENBACH, Hans: «Der gegenwärtige Stand der Relativitätsdiskussion», *Logos*, vol. X, 1921, n° 3, pp. 316-378. Reproducido en *Moderna filosofía de la ciencia*, Madrid, Tecnos, 1965, pp. 13-14.

⁵⁰ MACH, Ernst: *Die Prinzipien der physikalischen Optik*, Leipzig, J. A. Barth, 1921. Prefacio.

⁵¹ PETZOLDT, Joseph: «Positivische Philosophie», *Zeitschrift für positivische Philosophie*, vol. I, 1913, p. 8. Conferencia pronunciada en la *Gesellschaft für positivische Philosophie* de Berlín, el 11 de noviembre de 1912.

⁵² SCHLICK, Moritz: *Raum und Zeit in der gegenwärtigen Physik*, 2ª ed. Springer, Berlin, 1919, p. 77.

XX, al ser el impulsor del Círculo de Viena⁵³. Relacionado con el Círculo de Viena estaba el grupo de Berlín que giró, bajo el nombre de *Gesellschaft für empirische Philosophie*, en torno a la figura de Hans Reichenbach. Reichenbach insistió al igual que Petzoldt en el carácter empírico de la relatividad especial⁵⁴. Adolf Grünbaum, profesor de Filosofía de la Ciencia en la Universidad de Pittsburgh (EE.UU.), insistió en el origen empírico de la Relatividad, en fechas tan tardías como 1961-1964⁵⁵.

Para Bertrand Russell la teoría especial de la relatividad era «el resultado de la combinación de tres elementos, de los que se hizo uso para la reconstrucción de los principios de la física: la experimentación escrupulosa, el análisis lógico y ciertas consideraciones epistemológicas»⁵⁶. Russell compartía, en sus rasgos esenciales, la interpretación de la relatividad de Moritz Schlick y Hans Reichenbach, cuando escribió su obra *Análisis de la Materia* «... no hay que olvidar que los resultados experimentales fueron el motivo original de toda la teoría, y siguen siendo la base para emprender la tremenda reconstrucción lógica que suponen las teorías de Einstein.»⁵⁷.

El problema planteado a los neokantianos era de envergadura, pues surgió el interrogante de sí el análisis de las nuevas concepciones de *espacio y tiempo*, suponían una refutación de la filosofía de Kant. Ernst Cassirer abandonó la pretensión de los neokantianos radicales de interpretar la intuición pura de Kant como algo separado y sin conexión alguna con la intuición empírica. Para Cassirer el problema no estribaba tanto en salvar al pie de la letra la doctrina como en salvaguardar su método filosófico. En su obra «*Zur Einsteinschen Relativitätstheorie*», aparecida en 1921, mantenía que la relatividad instauraba una regla general más amplia que la determinada por el estrecho marco del espacio euclidiano y el tiempo uniforme kantianos, «Es verdad que hemos ido más

⁵³ Sobre el Círculo de Viena la bibliografía es impresionante, para nuestro interés véase KRAFT, Victor: *El Círculo de Viena*, Madrid, Taurus, 1966; JANIK, Allan y TOULMIN, Stephen: *La Viena de Wittgenstein*; CACCIARI, Massimo: *Krisis. Ensayo sobre la crisis del pensamiento negativo de Nietzsche a Wittgenstein*.

⁵⁴ REICHENBACH, Hans: *Die Philosophie der Raum Zeit Lehre*, Berlín, Walter de Gruyter, 1926; traducción al inglés *The Philosophy of Space and Time*, Nueva York, Dover Publications, 1957, p. 195. REICHENBACH, Hans: «The Philosophical Significance of the Theory of Relativity» en *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, SCHILPP, Paul Arthur (ed.), Evanston, Illinois: The Library of Living Philosophers, 1949, pp. 309-310.

⁵⁵ GRÜNBAUM, Adolf: «La Génesis de la teoría especial de la Relatividad», *Current Issues in the Philosophy of Science*, Herbert Feigl y Grover Maxwell eds., Nueva York, Holt, Rinehart and Winston, 1961, pp. 43-50, existe un amplio extracto traducido al castellano en *La teoría de la relatividad: sus orígenes e impacto sobre el pensamiento moderno*, Madrid, Alianza, 1983, pp. 119-125.

⁵⁶ RUSSELL, Bertrand: *Análisis de la Materia*, Taurus, Madrid, 1976, 1ª edición en inglés 1927, p. 63.

⁵⁷ RUSSELL, Bertrand: *ABC de la relatividad*, Ariel, Barcelona, 1984, p. 58. La obra original se publicó en inglés en 1925, siendo revisada en su tercera edición en inglés por Felix Pirani, con el consentimiento y supervisión de Russell, es esta edición revisada de la que proceden las citas de dicha obra.

allá de Kant. El estableció sus analogías de la experiencia de acuerdo esencialmente con las tres leyes fundamentales de Newton.»⁵⁸.

Henri Bergson en su obra *Durée et simultanéité —Duración y simultaneidad—*, publicada en 1922, se ocupó en extenso de la teoría de la relatividad⁵⁹. Para Bergson el tiempo local de la relatividad no era más que un «*tiempo respectivo*» observado desde diferentes puntos de referencia, la dilatación del tiempo no sería sino un *efecto de perspectiva* por el cual el «*tiempo local*» permanecería inalterado. El hincapié en el carácter aparente de la dilatación del tiempo y los intervalos espaciales condujeron a Bergson a mantener que la dilatación relativista del tiempo, así como la modificación relativista de longitudes eran inobservables por principio, y que no podrían ser verificadas empíricamente jamás. La realidad ha sido bastante diferente y ambos hechos han sido verificados empíricamente.

En España, Ortega y Gasset se ocupó de la Relatividad como continuación y confirmación de su obra *El tema de nuestro tiempo*⁶⁰, Ortega escribió *El sentido histórico de la teoría de Einstein*⁶¹. Para Ortega la relatividad «*contiene en germen la integridad de una nueva cultura*»⁶². El interés de la postura de Ortega no estriba tanto en la interpretación que de la relatividad hizo, como en su capacidad de influencia y de crear opinión en España y Latinoamérica.

En cuanto a la recepción por el marxismo en aquellos años, habría que decir con Loren R. Graham que «... la acogida dispensada por los soviéticos a la relatividad no fue particularmente hostil, si se la compara con la de otros países, y ello a pesar de que se pusiera de manifiesto alguna oposición a ella»⁶³. Fue S. In. Semkovski, el primer marxista soviético que la estudio con detalle en 1926, llegando a declarar que la nueva teoría de Einstein suponía una confirmación brillante del materialismo dialéctico. «Los físicos soviéticos de la preguerra conocían perfectamente las controversias sobre la relación entre ciencia y filosofía, como consecuencia de la amplia aceptación que habían tenido las opiniones de científicos tales como Ernst Mach y Henri Poincaré, y no ignoraban que estos nuevos puntos de vista conceptuales habían sido importantes para el desarrollo

⁵⁸ CASSIRER, Ernst: *Zur Einsteinschen Relativitätstheorie*, Bruno Cassirer, Berlín, 1921, p. 82.

⁵⁹ BERGSON, Henry: *Duración y simultaneidad: A propósito de la teoría de Einstein*, Buenos Aires, Ed. Del Signo, 2004.

⁶⁰ ORTEGA y GASSET, José: «Una lección universitaria», *El Sol*, 27 y 30 de diciembre de 1922 y 24 de enero, 3 y 9 de febrero y 22 de marzo de 1923. La ampliación del texto inicial en *La Nación*, Buenos Aires, 1 de mayo, 1 y 15 de julio y 12 de agosto de 1924, y en *El Sol* 31 de mayo de 1924. Recopilados en *El tema de nuestro tiempo*. Madrid, Alianza, 1987. OTERO CARVAJAL, Luis Enrique: «*Madrid científico: relatividad y relativismo en España*», en *Alfoz. Madrid, Territorio, Economía y Sociedad* n° 66-67, agosto-septiembre 1989, pp. 38-51.

⁶¹ ORTEGA y GASSET, José: «El sentido histórico de la teoría de Einstein», en *El tema de nuestro tiempo*, pp. 183-198.

⁶² ORTEGA y GASSET, José: «Medida a Einstein», *El Sol*, 11 de marzo de 1923, reproducido en *El tema de nuestro tiempo*, Madrid, Alianza, pp. 199-202. ORTEGA y GASSET, José: «El sentido histórico de la teoría de Einstein», pp. 183-198.

⁶³ GRAHAM, Loren R.: *Ciencia y filosofía en la Unión Soviética*, Madrid, Siglo XXI, 1976, p. 142.

por Einstein de la teoría de la relatividad. Aquellos físicos soviéticos que sabían que Mach había sido ampliamente criticado por Lenin podían albergar reticencias sobre la oportunidad de estudiar el trasfondo filosófico de la relatividad, pero en tanto que científicos se sentían tranquilizados por la cuidadosa distinción que hacía Lenin entre la ciencia y sus interpretaciones filosóficas.»⁶⁴.

La Teoría General de la Relatividad

La Teoría Especial de la Relatividad dejaba fuera de su campo toda una serie de problemas físicos, como los del campo gravitatorio y la *no equivalencia de todos los cuerpos de referencia de cara a la formulación de las leyes naturales*. Einstein dedicó los siguientes diez años de su labor científica a desarrollar un programa de investigación cuyo fin último consistió en generalizar la relatividad especial. Un camino plagado de dificultades y que no fue comprendido por la mayoría de los físicos de la época. «En el año 1905 había llegado yo, gracias a la teoría de la relatividad restringida, a la equivalencia de todos los llamados sistemas inerciales para la formulación de las leyes de la naturaleza. En esos momentos surgió de un modo natural el problema de si no existiría una equivalencia adicional para los sistemas de coordenadas. Para expresarlo en otras palabras: si sólo se puede adjudicar un significado relativo al concepto de velocidad, ¿debemos, con todo, seguir considerando la aceleración como un concepto absoluto?»⁶⁵. En 1907 Einstein escribió un artículo titulado «*El principio de la relatividad y sus consecuencias*» para la revista *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*⁶⁶, a lo largo de sus páginas reflexionaba sobre las relaciones entre el principio de relatividad y la gravitación. Einstein consiguió integrar los resultados de la Teoría Especial de la Relatividad en un sistema de referencia de movimiento uniformemente acelerado de carácter homogéneo, esto es la aplicación de las ecuaciones relativistas a un campo gravitatorio homogéneo. En la sección XX «*influencia de la gravitación en procesos electromagnéticos*», Einstein presentó por vez primera una de las principales conclusiones de lo que posteriormente sería la Teoría General de la Relatividad: la influencia del campo gravitatorio sobre la velocidad de la luz, que a primera vista parecía un contrasentido respecto de la Teoría Especial de la Relatividad.

⁶⁴ SEMKOVSKI, S. In.: *Dialekticheski materializm: printsip otositel nosti*, Moscú y Leningrado, 1926, pp. 9-11, citado en GRAHAM, Loren R.: *Ciencia y filosofía en la Unión Soviética*, op. cit., p. 142. JORAVSKY, D.: *Soviet Marxism and Natural Science, 1917-1932*, Nueva York, 1961. GRAHAM, Loren R.: *Ciencia y filosofía en la Unión Soviética*, op. cit., p. 142

⁶⁵ EINSTEIN, Albert: «Notas sobre el origen de la teoría de la relatividad general», *Mein Weltbild*, Amsterdam: Querido Verlag, 1934, reproducido al castellano en EINSTEIN, Albert: *Sobre la teoría de la relatividad*, Madrid, Sarpe, 1983, ed. cedida por Antoni Bosch editor, pp. 94-95.

⁶⁶ EINSTEIN, Albert: «Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen», *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*, nº 4, 1907, p. 411-462, existe traducción al inglés en SCHWARTZ, H. M.: *American Journal Physics* 45, 1977, pp. 512-517, 811-817 y 899-902.

En 1911 publicó un artículo titulado «*Sobre la influencia de la gravitación en la propagación de la luz*»⁶⁷. En este artículo Einstein centró su atención en posibilidad de la comprobación empírica de los resultados obtenidos en el artículo de 1907, sobre todo la curvatura en la trayectoria de los rayos lumínicos a su paso por un campo gravitacional intenso. En 1913 los trabajos de Einstein sobre la gravitación en su intento de generalizar la teoría de la relatividad no eran comprendidos por sus colegas⁶⁸.

Habrían de transcurrir todavía dos años para que la Teoría General de la Relatividad encontrase su definitiva configuración, dos años en los que Einstein, en colaboración con Marcel Grossmann, matemático experto en geometría diferencial, viejo amigo, compañero de estudios y colega suyo en el Instituto Politécnico de Zurich, avanzó en la comprensión de la geometría riemanniana, que resultó fundamental para el desarrollo de la Teoría General⁶⁹. Entre 1912 y 1913 Einstein llegó a la conclusión de la necesidad de abandonar el espacio-tiempo minkowskiano plano si quería tener éxito en la generalización de la relatividad. Las razones se encuentran en su percepción de la importancia, y las consecuencias físicas, de la curvatura de los rayos lumínicos por la acción de un campo gravitatorio, que evidenciaban una estructura espacial curvada por efecto de la gravitación. El problema al que se enfrentaba en 1913 Einstein, era encontrar o desarrollar una geometría que fuese capaz de dar cuenta y representar un espacio-tiempo curvado.

En 1914 Einstein estaba convencido de que el camino era el acertado⁷⁰, entre mediados de 1914 y principios de 1915, Einstein se percató de que el camino emprendido, con el abandono de la covariancia general, no conducía a resultados plenamente satisfactorios⁷¹. Fue en el mes de noviembre de 1915 cuando Einstein llegó a la formulación definitiva de la Teoría General de la Relatividad. Culminaba así un largo período de diez años lleno de obstáculos. La exposición definitiva de la Teoría General la realizó en la Academia Prusiana de Ciencias en la sesión celebrada el 25 de noviembre de 1915, bajo el título: «*Die Feldgleichungen der Gravitation*»⁷²; En 1916 publicó el artículo «*Die Grundlage*

⁶⁷ EINSTEIN, Albert: «Einfluss der Schwerkraft auf die Ausbreitung der Lichtes», aparecido en *Annalen der Physik*, 35, 1911, pp. 898-908.

⁶⁸ A. Einstein, carta dirigida a Michele Besso a fines de 1913, reproducida en *Albert Einstein correspondencia con Michele Besso. (1903-1955) op. cit.*, pp. 107-108.

⁶⁹ SÁNCHEZ RON, José Manuel: *op. cit.*, pp. 155-162.

⁷⁰ A. Einstein, carta dirigida a Michele Besso a principios de marzo de 1914, reproducida en *Albert Einstein correspondencia con Michele Besso. (1903-1955), op. cit.*, pp. 109-110.

⁷¹ SÁNCHEZ RON, José Manuel: *op. cit.*, p. 161.

⁷² EINSTEIN, Albert: «Die Feldgleichungen der Gravitation», *Preussische Akademie der Wissenschaften, Sitzungsberichte*, Berlin, 1915, n° 44, pp. 844-847. antes de la misma, en las sesiones de los días 4, 11 y 18 de noviembre presentó los antecedentes inmediatos de dicha teoría: EINSTEIN, Albert: «Grundgedanken der allgemeinen Relativitätstheorie und Anwendung dieser Theorie in der Astronomie» *Preussische Akademie der Wissenschaften, Sitzungsberichte*, 1915, pt. I, p. 315. EINSTEIN, Albert: «Zur Allgemeinen Relativitätstheorie», *Preussischen Akademie der Wissenschaften Sitzungsberichte der Königlichen*, Berlín, 1915, n° 44, pp. 778-786 y suplemento 799-80. EINSTEIN,

der Allgemeinen Relativitätstheorie» (*Los fundamentos de la teoría de la relatividad general*), en el que presentaba de forma completa y desarrollada la Teoría General de la Relatividad⁷³.

Las consecuencias cosmológicas de la Teoría de la Relatividad General constituyen uno de los principales resultados de la nueva teoría. La visión del Universo procedente de la física newtoniana dejó paso a una nueva contemplación del Universo radicalmente diferente de la visión procedente de la Física moderna⁷⁴. La representación geométrica de la relatividad general, regida por las coordenadas gaussianas, la geometría riemanniana y el desarrollo matemático de Ricci y Levi-Civita, dio lugar a una representación geométrica del continuo espacio-temporal bastante alejada de la representación euclídea. La existencia de diferentes grados de curvatura del continuo espacio-temporal viene determinada por la densidad de la materia en las diferentes regiones del continuo espacio-temporal. En regiones del espacio-tiempo con una alta densidad másica la curvatura será mayor que la existente en regiones de menor densidad másica, por la acción de los campos gravitatorios. *La materia da lugar a una curvatura de la geometría del espacio-tiempo*, pero también la materia del Universo se encuentra condicionada por la curvatura del espacio-tiempo o, lo que es lo mismo, *la materia encuentra condicionado su movimiento debido a la curvatura del espacio-tiempo*. Tras la comprobación de la existencia del fondo de radiación de microondas por Penzias y Wilson la teoría del *Big Bang* se afirmó como la representación del Universo coherente con la relatividad general⁷⁵.

Albert: «Erklärung der Perihelbewegung des Merkur aus der allgemeinen Relativitätstheorie», *Preussischen Akademie der Wissenschaften, Sitzungsberichte der Königlischen*, Berlín, 1915, n° 44, pp. 831-839.

⁷³ EINSTEIN, Albert: «Die Grundlage der Allgemeinen Relativitätstheorie», en *Annalen der Physik*, 49, 1916, pp. 769-822, en diciembre de 1916, Einstein terminó un pequeño libro sobre la relatividad: *Über die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie Gemeinverständlich*. Braunschweig, Vieweg, 1917, 70 pp., existe traducción al castellano *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*, Madrid, Alianza, 1984.

⁷⁴ EINSTEIN, Albert: *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*, op. cit., pp. 91-92.

⁷⁵ KOYRÉ, Alexandre: *Del mundo cerrado al universo infinito*, Siglo XXI, Madrid, 1984 (4ª ed.). MERLEAU-PONTY, Jacques: *Cosmología del siglo XX*, Madrid, Gredos, 1971. OTERO CARVAJAL, Luis Enrique: *La crisis de la Modernidad. La quiebra de la representación determinista*. Einstein, A.: «Kosmologische Betrachtungen zur allgemeine Relativitätstheorie», *Sitzungsberichte der königlischen preussischen Akademie der Wissenschaften*, 1917, pp. 142-152, existe reimpresión en EINSTEIN, A., LORENTZ, H. A., MINKOWSKI, H. et. al.: *The Principle of Relativity*, London, Methuen and Co., Ltd., 1923, reimpresso en New York, Dover Publications, Inc. EINSTEIN, Albert: «On the Cosmological Problem», en *The Meaning of Relativity* (apéndice a la segunda edición, 1945), Princeton, Princeton University Press, 142 págs., reproducido también en EINSTEIN, Albert: «On the Cosmological Problem», *American Scholar*, vol. 14, 1945, pp. 137-156. NORTH, J. D.: *The Measure of the Universe*, Oxford, Clarendon Press, 1965, Dover, 1990. NARLIKAR, Jayant: *La estructura del Universo*, Madrid, Alianza, 1987. ROBERTSON, Howard Percy: «On the foundations of relativistic Cosmology», *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 15, 1929, pp. 822-829. ROBERTSON, Howard Percy: «Relativistic Cosmology», *Reviews of Modern Physics*, 5, 1933. LEMAÎTRE, George: «The cosmological constant», en *Einstein Philosopher-Scientist*, P.A. SCHILPP, P. A. (ed.): op. cit., pp. 439-456. EDDINGTON, Arthur Stanley: *The expanding Universe*, Cambridge University Press, 1933.

En 1919 la *Royal Society* organizó dos expediciones, bajo la dirección de los astrónomos ingleses Eddington y Crommelin, con el objeto de estudiar el eclipse solar del 29 de mayo de 1919⁷⁶. Eddington se convirtió de inmediato en un adalid de la relatividad en Gran Bretaña⁷⁷; en marzo de 1917, sir Frank Watson Dyson, astrónomo real, señaló la excelente ocasión que se presentaba durante el eclipse solar del 29 de mayo de 1919 para observar la existencia o no de la curvatura de la luz⁷⁸. Los resultados obtenidos por la doble expedición probaron que las predicciones establecidas por la Teoría de la Relatividad General, sobre la curvatura de la trayectoria de la luz bajo la acción de un campo gravitatorio, eran

GAMOW, George: «On relativistic Cosmology», *Reviews of Modern Physics*, 21, nº 3, 1949, pp. 367-373. GAMOW, George: *La Création de l'Univers*, traducción al francés, Paris, Dunod, 1956. ALPHER, R. A., BETHE, H. A. y GAMOW, G.: «The origin of the chemical elements», *Physical Review (letters)*, vol. 73, 1948. PENZIAS, A. A. y WILSON, R. W.: «A measurement of excess antenna temperature at 4080 Mc/sec» («Una medición de un exceso de temperatura de antena a 4.080 Mc/s»), *Astrophysical Journal*, 1965. DICKE, R. H., PEEBLES, P. J. E., ROLL, P. G. y WILKINSON, D. T.: «Cosmic Black-Body Radiation», *Astrophysical Journal*, vol. 142, 1965, pp.414-419. ALPHER, R. A.; FOLLIN, JR., J. W. Y HERMAN, R. C.: «Physical Conditions in the Initial Stages of the Expanding Universe», *Physical Review*, 92, 1953, pp. 1.347-1.361. WEINBERG, Steven: *Los tres primeros minutos del Universo*, Madrid, Alianza, 1982, (1ª ed. en inglés 1977). HAWKING, Stephen W.: «La Mecánica cuántica de los agujeros negros», *Investigación y Ciencia*, nº 6, marzo de 1977, pp. 22-29. HAWKING, Stephen W.: *Agujeros negros y pequeños universos*, Barcelona, Plaza y Janés, 1994. HAWKING, Stephen W.: *Historia del tiempo: del big bang a los agujeros negros*, Madrid, Alianza, 1997. HAWKING, Stephen W.: «El universo no tiene fronteras», texto de la conferencia pronunciada en la Universidad de Salamanca, en octubre de 1987, bajo el título: «El origen del universo». Reproducido en: *Tendencias científicas y sociales*, nº 6, Madrid, septiembre 1988. THORNE, Kip S.: *Agujeros negros y tiempo curvo*, Barcelona, Crítica, 1995. YNDURÁIN, Francisco José: «Teorías unificadas de las interacciones fundamentales», *Investigación y Ciencia*, nº 18, marzo 1978, pp. 6-15; FREEDMAN, D. Z. y NIEUWENHUIZEN, P. van: «Supergravedad y la unificación de las leyes de la física», *Investigación y Ciencia*, nº 19, abril 1978, pp. 78-91; FREEDMAN, D. Z., NIEUWENHUIZEN, P. van y FERRARA, S.: «Progress toward a Theory of Supergravity», *Physical Review D.: Particles and Fields*, vol. 13, nº 12, 1976, pp. 3.214-3.218. GRISARU, M. T., NIEUWENHUIZEN, P. Van y VERMASEREN, J. A. M.: «One-Loop Renormalizability of Pure Supergravity and of Maxwell-Einstein Theory in extended Supergravity», en *Physical Review (Letters)*, vol. 37, nº 25, 1976, pp. 1.662-1.666; GEORGI, Howard: «Teoría unificada de las partículas elementales y las fuerzas», en *Investigación y Ciencia*, nº 57, junio 1981, pp. 18-36. HAWKING, Stephen W., THORNE, Kip S., NOVIKOV, Igor, FERRIS, Timothy y LIGHTMAN, Alan: *El futuro del espaciotiempo*, Barcelona, Crítica, 2003.

⁷⁶ W. DE SITTER publicó un artículo en la revista *Observatory* sobre la relatividad general, en el nº 39 (1916), p. 412, igualmente publicó tres artículos en la revista *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, en los que De Sitter desarrollaba la relatividad general y señalaba la importancia del experimento propuesto por Einstein, estos artículos aparecieron en los números 76 (1916) y 78 (1917), que llamaron la atención de Eddington.

⁷⁷ A. S. EDDINGTON presentó un informe a la *Royal Astronomical Society* en febrero de 1917 en el que señalaba la importancia de comprobar las predicciones de Einstein sobre la curvatura de la luz, fue publicado por la *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* en el número 77 de 1917, p. 377.

⁷⁸ DYSON, Frank Watson: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, nº 77, 1917, p. 445. Eddington, A. S.: *Observatory*, nº 42, 1919, p. 119. La expedición de A. C. D. CROMMELIN se dirigió a Sobral, al Norte de Brasil; la dirigida por A. S. EDDINGTON tomó como punto de observación la isla Príncipe, situada en el Golfo de Guinea.

correctas⁷⁹. Estos resultados fueron presentados por Dyson, Crommelin y Eddington como la confirmación de la teoría de la relatividad, y así fueron acogidos por la comunidad internacional de físicos⁸⁰. Fueron el cálculo exacto del avance del perihelio de Mercurio y, sobre todo, la expedición enviada por la *Royal Society* en 1919 los que abrieron el paso a la aceptación generalizada de la relatividad entre la comunidad de científicos (la comprobación empírica del desplazamiento hacia el rojo de los rayos lumínicos no jugó ningún papel, al producirse en fechas tan tardías como 1955 y 1960)⁸¹.

La Teoría Cuántica y la Discontinuidad en la Física

A finales de 1894 Max Planck inició un programa de investigación cuyo objetivo perseguía explicar la igualdad existente entre la radiación emitida por un cuerpo negro y la radiación de equilibrio (esto es, la igualdad entre energía emitida y absorbida en un intervalo de tiempo) de una cavidad cualquiera, tal como fue definido por Kirchhoff entre 1859 y 1860 en la ley de radiación de Kirchhoff⁸². En el estudio de la radiación de cuerpo negro, y en la solución al problema de la intensidad de dicha radiación, entraban en juego la termodinámica, la teoría electromagnética y la mecánica estadística. Tres de las ramas de la física que constituían la vanguardia de la física de finales del siglo XIX. Tres campos de la física en los que Planck había trabajado con anterioridad. Entre diciembre de 1900 y enero de 1901 Planck publicó dos artículos, bajo el título «*Zur Theorie des Gesetzes der Energievertheilung im Normalspectrum*»⁸³ y «*Über das*

⁷⁹ CABRERA, Blas: *Principio de Relatividad. Sus fundamentos experimentales y filosóficos y su evolución histórica*, Madrid, Publicaciones de la Residencia de Estudiantes, Serie I, vol. 7, 1923, p. 252. Existe reedición facsímil en Barcelona, Alta Fulla «Mundo Científico», 1986, col. «Nostulabium».

⁸⁰ El informe preliminar fue presentado por Eddington en la reunión de la Asociación Británica celebrada en Bournemouth entre los días 9 y 13 de septiembre de 1919, y posteriormente en la famosa sesión conjunta de la *Royal Society* y la *Royal Astronomical Society* celebrada el 6 de noviembre de 1919 en Londres. BERTOTTI, B., BRILL, D. y KROTKOV, R. en *Gravitation* (L. Witten, ed.), New York, Wiley, 1962, p. 1; EARMAN, J. y GLYMOUR, G.: «Relativity and Eclipses: The British Eclipse Expeditions of 1919 and their Predecessors» en *Historical Studies in the Physical Sciences*, nº 11 1, 1980, pp. 49-85; D.F. Moyer: *On the Path of Albert Einstein*, Plenum Press, Nueva York, 1979, p. 55.

⁸¹ SÁNCHEZ RON, José Manuel: *El origen y desarrollo de la relatividad*, op. cit., p. 181.

⁸² KIRCHHOFF, Gustav Robert: «Über den Zusammenhang zwischen Emission un Absorption von Licht und Wärme», *Moonatsberichte der Akademie der Wissenschaften zu Berlin*, 1859, pp. 783-787, y «Über das Verhältnis zwischen dem Emissionsvermögen und dem Absorptionsvermögen der Körper für Wärme und Licht», *Annalen der Physik*, 109, 1860, pp. 275-301; los resultados se encuentran recogidos en la obra de Kirchhoff: *Gesammelte Abhandlungen*, Leipzig, 1882, pp. 566-597. SÁNCHEZ RON, José Manuel: *Historia de la física cuántica. I. el período fundacional (1860-1926)*. Barcelona, Crítica, 2001.

⁸³ PLANCK, Max: «Zur Theorie des Gesetzes der Energievertheilung im Normalspectrum», *Verhandlungen der Deutsche physikalische Gessellschaft, Berichte*, 2, 1900, pp. 237-245; I, pp. 698-706.

Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum»⁸⁴. Fue en el artículo de diciembre de 1900 en el que Planck introdujo por primera vez el *cuanto de acción*, al definir el tamaño de los diferentes elementos de energía, a la hora de calcular la entropía de una distribución arbitraria de energía. Para ello recurrió al método seguido por Boltzmann a la hora de subdividir el continuo de energía en elementos de tamaño finito, pero fue mucho más allá al señalar que éstos debían de tener un valor constante y proporcional a la frecuencia, de esta manera introdujo el *cuanto de acción* en la física. Planck era consciente de que había encontrado la solución del problema del cuerpo negro, pero no fue capaz de comprender qué significaba dicha solución hasta después de 1906. En su obra *Lecciones sobre la teoría de la radiación térmica* aparecía un párrafo hartamente significativo:

Un rasgo de este resultado [se refiere a] que choca de inmediato es la entrada de una constante universal h cuyas dimensiones son un producto de energía por tiempo. Supone una diferencia esencial respecto a la expresión de la entropía de un gas... Así pues, *la termodinámica de la radiación no llegará a una conclusión enteramente satisfactoria hasta entender el pleno y universal significado de la constante h . Quisiera llamarle el «cuanto de acción» o el «elemento de acción», por tener las mismas dimensiones que la magnitud a la que el Principio de Mínima Acción debe su nombre. [el subrayado es añadido]*⁸⁵.

La fórmula de Planck $E = hn$ resultaba extraña para los físicos de la época, porque establecía una igualdad entre la energía concebida como discontinua y la energía considerada como continua, en función del carácter ondulatorio de la frecuencia. Sólo Einstein al postular en 1905 la existencia de partículas de luz (fotones) y con ello el carácter corpuscular y ondulatorio de la luz comprendió en toda su magnitud el alcance de la teoría de Planck⁸⁶. Una posición que gozó de la animadversión del resto de los físicos que atrapados por la teoría ondulatoria de la luz podían concebir un comportamiento tan extraño, a primera vista tan contrario con los postulados de la física. A la altura de 1906 Planck había identificado el *cuanto de acción* con h , estableciendo además que era una constante universal, pero aún no había llegado a la conclusión de que dicho descubrimiento suponía introducir la discontinuidad en la Física. Es posible que por estas razones los artículos de diciembre de 1900 y enero de 1901, junto con su obra *Lecciones*

⁸⁴ PLANCK, Max: «Über das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum», en *Annalen der Physik*, 4, 1901, pp. 553-563.

⁸⁵ PLANCK, Max: *Vorlesungen über die Theorie der Wärmestrahlung*, p. 153 y ss., citado en KUHN, Th. S.: *La teoría del cuerpo negro...*, op. cit..

⁸⁶ EINSTEIN, Albert: «Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt», en *Annalen der Physik*, nº 17, 1905, p. 132. «Sobre un punto de vista heurístico concerniente a la producción y transformación de la luz», *Einstein 1905: un año milagroso. Cinco artículos que cambiaron la física*. Prólogo de Roger PENROSE, STACHEL, John (ed.), Barcelona, Crítica, 2001, pp. 161-178, también en *Cien años de relatividad. Los artículos clave de Albert Einstein de 1905 y 1906*. Antonio RUIZ DE ELVIRA (trad., introd. y notas). Madrid, Nivola, 2004, pp. 45-71.

sobre la teoría de la radiación térmica aparecida en 1906, no fuesen valorados por los físicos de la época como una aportación que revolucionaría los cimientos de la física⁸⁷. Tan sólo en 1922 con la introducción del efecto Compton⁸⁸ y el desarrollo de la mecánica cuántica con Heisenberg, Schrödinger, Bohr, Born y otros la solución propuesta por Einstein se abrió camino y fue cabalmente entendida.

Para alcanzar el resultado de Planck era preciso establecer, señaló Ehrenfest, una restricción que constituía una ruptura con la teoría clásica, como era el limitar la energía de cada modo de vibración a múltiplos enteros del elemento de energía⁸⁹. En ello jugó un papel de primer orden la reinterpretación realizada por Ehrenfest de la combinatoria utilizada por Planck en su teoría del cuerpo negro⁹⁰. A conclusiones similares, aunque por caminos diferentes, había llegado Einstein por las mismas fechas. Tres meses antes del artículo de junio de 1906 de Ehrenfest, había enviado Einstein su artículo: «*Sobre la teoría de la emisión y la absorción de la luz*»⁹¹.

En su artículo «*Über einer die Erzeugung und Verwardlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt*» (*Sobre un punto de vista heurística concerniente a la emisión y transformación de la luz*)⁹², por el que luego le fue

⁸⁷ KUHN, Th. S.: *La teoría del cuerpo negro...*, op. cit., p. 163.

⁸⁸ STUEWER, Roger H.: *The Compton Effect. Turning Point in Physics*, Nueva York, Science History Publications, 1975.

⁸⁹ EHRENFEST, Paul: «Über die physikalischen Voraussetzungen der Planck'schen Theorie der irreversiblen Strahlungsvorgänge» («Sobre los presupuestos físicos de la teoría de los procesos de radiación irreversibles de Planck»), *Wiener Ber.*, 114, 1905, pp. 1.301-1.314. EHRENFEST, Paul: «Zur Planckschen Strahlungstheorie», *Physikalische Zeitschrift*, 7, 1906, pp. 528-532.

⁹⁰ KUHN, Thomas S.: *La teoría del cuerpo negro...*, op. cit., p. 197.

⁹¹ EINSTEIN, Albert: «Zur Theorie der Licherzuzugung und Lichtabsorption», *Annalen der Physik*, 20, 1906, pp. 199-206. «Sobre la teoría de la emisión y la absorción de la luz», *Cien años de relatividad. Los artículos clave de Albert Einstein de 1905 y 1906*, pp. 189-199. Einstein en sus inicios como físico se sentía fuertemente atraído por la termodinámica, y dentro de ella por el enfoque estadístico desarrollado por Boltzmann en su *Teoría de los gases*. Sus primeros artículos se ocuparon de este tema, en ellos que intentó formular una termodinámica estadística que no se limitase exclusivamente al estado gaseoso. EINSTEIN, Albert: «Folgerungen aus den Kapillaritätserscheinungen», en *Annalen der Physik*, ser. 4, vol. 4, 1901, pp. 513-523; «Thermodynamische Theorie der Potentialdifferenz Zwischen Metallen und vollständig dissoziierten Lösungen ihrer Salze, und eine elektrische Methode zur Erforschung der Molekularkräfte» en *Annalen der Physik*, ser. 4, vol. 8, 1902, pp. 798-814; «Kinetische Theorie des Wärmegleichgewichtes und des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik», en *Annalen der Physik*, ser. 4, vol. 9, 1902, pp. 417-433; «Theorie der Grundlagen der Thermodynamik», en *Annalen der Physik*, ser. 4, vol. 11, 1903, pp. 170-187; «Allgemeine molekulare Theorie der Wärme», en *Annalen der Physik*, ser. 4, vol. 14, 1904, pp. 354-362. En su artículo «*Allgemeine molekulare Theorie der Wärme*», en *Annalen der Physik*, ser. 4, vol. 14, 1904, pp. 354-362, se ocupó de establecer el significado físico de la constante universal introducida por él en el artículo de 1903, «*Theorie der Grundlagen der Thermodynamik*», por el que la fluctuación de energía debía de tener un carácter físico fundamental, lo que le condujo a ocuparse del problema del cuerpo negro. KLEIN, Martin J.: «Thermodynamics in Einstein's Thought», en *Science*, 157, 1967, pp. 509-516.

⁹² EINSTEIN, Albert: «Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt», en *Annalen der Physik*, ser. 4, vol. 17, 1905, pp. 132-148. «Sobre un punto de vista heurística concerniente a la emisión y transformación de la luz», en *Cien años de relati-*

concedido el premio Nobel por explicar el efecto fotoeléctrico, analizaba la ley de Planck y su comportamiento a altas y bajas y bajas frecuencias⁹³. Einstein se encontraba inmerso en una reflexión de carácter más general sobre algunos de los graves problemas que aquejaban a la física de su tiempo, el mismo año y en la misma revista publicaba el artículo donde exponía la Teoría de la Relatividad Especial⁹⁴. Dentro de este programa general, la teoría desarrollada en «*Un punto de vista heurístico...*» se encontraba íntimamente relacionada con el problema más general de la estructura de la luz, y dentro de ella aparecía la contradicción entre la naturaleza corpuscular de la materia, de carácter, por tanto, discreto y la naturaleza ondulatoria de la radiación, de carácter continuo. La contradicción existente entre la materia discontinua y la radiación que emite o absorbe de forma continua no podía dejar de desagradar a un físico como Einstein.

En su intento de resolver dicho problema dirigió su atención al análisis del fenómeno de la radiación del cuerpo negro. Einstein conocía la obra de Planck aunque en aquellos años (1905) no se mostraba muy satisfecho con ella. «Entonces me daba a mi la impresión [cuando publicó el artículo de 1905 un punto de vista heurístico] como si la teoría de Planck de la radiación fuese contradictoria en determinada relación con mi trabajo. Nuevas reflexiones,... me mostraron, empero, que las bases teóricas sobre las que descansa la teoría de la radiación del Sr. Planck, se diferencian de aquellas en que se basa la teoría de Maxwell y de la teoría de los electrones, y de hecho en que la teoría de Planck hace uso implícito de la hipótesis de los cuantos de luz que se acaba de mencionar.»⁹⁵, y conocía el fenómeno denominado *catástrofe del ultravioleta*⁹⁶, que generaba fuertes sospechas sobre el supuesto de la distribución continua de la energía. Einstein conocía los trabajos experimentales de Philip Lenard sobre la

vidad. *Los artículos clave de Albert Einstein de 1905 y 1906*, 2004, pp. 45-71; y en STACHEL, John (ed.): *Einstein 1905: un año milagroso. Cinco artículos que cambiaron la física*, Barcelona, Crítica, 2001, pp. 161-178.

⁹³ KLEIN, Martin J.: «Einstein's First Paper on Quanta», *The Natural Philosopher*, 2, 1963, pp. 59-86; KUHN, Thomas S.: *op. cit.*, pp. 212-214.

⁹⁴ EINSTEIN, Albert: «Zur elektrodynamik bewegter körper» en *Annalen der Physik*, vol. XVII, 1905, pp. 891-921. «Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento» en *Cien años de relatividad. Los artículos clave de Albert Einstein de 1905 y 1906*, pp. 88-139, y STACHEL, John (ed.): *Einstein 1905: un año milagroso...*, *op. cit.*, pp. 111-143.

⁹⁵ EINSTEIN, A.: «Zur Theorie der Lichterzeugung und Lichtabsorption», en *Annalen der Physik*, ser. 4, vol. 20, pp. 199-206, cita p. 199. «Sobre la teoría de emisión y absorción de luz», en *Cien años de relatividad. Los artículos clave de Albert Einstein de 1905 y 1906*, *op. cit.*, p. 189.

⁹⁶ En el estudio de la radiación del cuerpo negro aparecía un problema que sería conocido con el nombre de la *catástrofe ultravioleta*, que ponía en cuestión la teoría de la radiación clásica. Conforme aumenta la temperatura, las longitudes de onda se van haciendo más cortas, hasta alcanzar el extremo ultravioleta del espectro. Los problemas surgían cuando atribuían valores a la energía de las partículas responsables de la radiación. Si la energía era continua, como postulaba la teoría, significaba que en el extremo de ondas cortas (alta frecuencia) del espectro la energía de la radiación se tornaría infinita, al propiciar un aumento continuo de la energía hacia el infinito al disminuir la longitud de onda. De esta manera, la teoría clásica se enfrentaba a un problema irresoluble, la *catástrofe del ultravioleta*, pues un cuerpo incandescente no irradiaba una cantidad infinita de energía.

absorción de alta frecuencia en ciertos metales. En este caso la transferencia de energía, procedente del rayo luminoso, es de tal magnitud que algunos de los electrones de la superficie del metal bombardeado son arrancados. Este fenómeno analizado por Einstein es conocido como *efecto fotoeléctrico*. Conforme aumentaba la frecuencia de la luz emitida sobre el metal aumentaba la energía, según la teoría clásica de la radiación los electrones arrancados de la lámina del metal deberían poseer una mayor energía, y, por tanto, alcanzar velocidades mayores que los electrones desprendidos a frecuencias menos elevadas. Sin embargo, Lenard observó que no ocurría así, los electrones poseían la misma energía, la única diferencia consistía en que a mayores frecuencias era mayor el número de electrones desprendidos.

Einstein interpretó de forma correcta estos resultados en su artículo de 1905, el *efecto fotoeléctrico* no podía ser interpretado desde la teoría ondulatoria de la luz; la luz debía de estar compuesta por partículas, *fotones*, que portarían una cantidad discreta de energía equivalente al valor del cuanto de acción de Planck. Quedaba así explicado el efecto observado por Lenard, puesto a que al incrementar la frecuencia del rayo luminoso emitido se incrementaba el número de fotones del mismo, pero estos no variaban su energía que es constante. Por tanto, se producía un mayor número de impactos de fotones sobre la lámina de metal, con lo que el número de choques de fotón/electrón del metal se incrementaba en razón del aumento de la frecuencia de la luz emitida y, por consiguiente, aumentaba el número de electrones desprendidos, pero no se producía un incremento de la energía de dichos electrones. Al permanecer constante la energía de los fotones se evitaba así la *catástrofe del ultravioleta* y el *efecto fotoeléctrico* quedaba explicado.

En contrapartida, era absolutamente necesario abandonar la idea de una energía continua e introducir la discontinuidad en la física, por cuanto la energía era emitida y absorbida de manera discontinua. Einstein iba más allá, en su artículo «*Un punto de vista heurístico...*» postulaba que la naturaleza de la luz no era sólo ondulatoria sino también corpuscular, por la existencia de partículas luminosas, los fotones, con ello se enfrentaba a la teoría dominante sobre la naturaleza de la luz, que postulaba su carácter ondulatorio. A cambio introducía una teoría absolutamente extraña en la que defendía la dualidad ondulatorio-corpuscular de la luz. La ruptura que proponía con la física clásica era de tan profundas consecuencias que su artículo no fue tomado en consideración hasta varios años después; cuando esto ocurrió, en 1910, sólo lo fue en lo referente a su explicación del efecto fotoeléctrico y en su defensa de la discontinuidad de la teoría de Planck.

Los artículos de Einstein y Ehrenfest señalaban con claridad que la ley de Planck hacía necesario proceder a una ruptura con la física clásica. Einstein fue quien con mayor claridad lo expuso en sus artículos de 1905, «*Sobre un punto de vista heurístico concerniente a la emisión y transformación de la luz*», y de 1906 «*Sobre la teoría de emisión y absorción de luz*», en los que señalaba con claridad que la introducción de cantidades discretas en la emisión de la radiación conllevaba necesariamente la discontinuidad. Esta posición era a la altura de 1906 una

postura aislada y prácticamente reducida a Einstein y Ehrenfest, a la sazón dos jóvenes físicos prácticamente desconocidos por aquel entonces⁹⁷.

La aceptación de la Discontinuidad por parte de la comunidad de físicos

A la altura de 1908, el panorama comenzó a cambiar a partir de la reconsideración del problema por parte de Lorentz, convertido en aquellos años en el gran patriarca de la Física⁹⁸, su conferencia de Roma de ese año, «*La división de la energía entre materia ponderable y el éter*» marcó el giro decisivo, a partir de ese momento Lorentz abandonó sus intentos de dar una explicación clásica de la radiación negra⁹⁹. En 1908 Planck no había abandonado la esperanza de encontrar una solución satisfactoria de su teoría con la teoría de los electrones que respetara las ecuaciones de Maxwell¹⁰⁰. Su apego a la visión clásica de la teoría electromagnética y a la teoría del éter condicionaba su visión, a pesar de que desde 1905 conocía la teoría especial de la relatividad. En 1909, Einstein publicó un nuevo artículo en el que insistió en los resultados alcanzados en su trabajo de 1906¹⁰¹ y la necesidad de proceder a una profunda revisión de la teoría clásica de la radiación: «Adoptar la teoría de Planck es, en mi opinión, rechazar los fundamentos de nuestra teoría de la radiación.»¹⁰²

En 1909 Einstein ya no era ese joven desconocido que en 1905 publicó varios artículos que revolucionaron la física del siglo XX, con la teoría especial de la relatividad y la explicación del efecto fotoeléctrico, en la conferencia de la Asamblea de Científicos Alemanes celebrada en Salzburgo llamó la atención de que la introducción de la discontinuidad excedía el marco de la interacción entre materia y radiación¹⁰³. Sólo ante la evidencia abrumadora de la imposibilidad de reconciliar los fenómenos de la radiación con la física clásica logró imponerse progresivamente la discontinuidad en la física. «La mayoría de aquellos que introdujeron la constante h de Planck en otros campos no se percataron, al principio, del alcance de la ruptura involucrada. Hasta después de 1910, casi nadie

⁹⁷ KUHN, Thomas S.: *La teoría del cuerpo negro...*, op. cit., p. 221.

⁹⁸ Ibidem, pp. 222-223.

⁹⁹ LORENTZ, H. A.: «Le partage de l'énergie entre la matière pondérable et l'éther», *Atti del IV Congresso Internazionale dei Matematici*, Roma, 6-11 de Aprile 1908, 3 vols., Roma, 1909, vol. I, pp. 145-165; reimpresión en inglés H.A. LORENTZ: *Collected Papers*, vol. 7, pp. 317-346.

¹⁰⁰ KUHN, Th. S.: *La teoría del cuerpo negro...*, op. cit., p. 231.

¹⁰¹ EINSTEIN, Albert: «Zum gegenwärtigen Stande des Strahlungsproblems», en *Physikalische Zeitschrift*, vol. 10, 1909, pp. 185-193.

¹⁰² EINSTEIN, Albert: «Über die Entwicklung unserer Anschauungen über das Wesen und die Konstitution der Strahlung», en *Physikalische Zeitschrift*, vol. 10, 1909, pp. 817-825, cita de la p. 822, reproducción de la conferencia pronunciada en Salzburgo con motivo de la *Gessellschaft Deutscher Naturforscher*, publicada también en *Deutsche physikalische Gessellschaft, Verhandlungen*, Jahrg. II, 1909, pp. 482-500.

que no hubiese bregado denodadamente con el problema del cuerpo negro estaba convencido de la necesidad de una nueva física discontinua.»¹⁰⁴.

A partir de 1911 un nuevo tema apareció con fuerza en el desarrollo de la teoría cuántica, el problema de los calores específicos de los sólidos, su aparición se debió a un artículo publicado en 1907 por Einstein¹⁰⁵, donde establecía una fórmula para el calor específico de los sólidos que para temperaturas muy bajas determinaba que la capacidad calorífica de todos los sólidos debía tender a cero conforme nos acercamos al cero absoluto, en clara contradicción con los resultados previstos por la teoría clásica¹⁰⁶. El problema de los calores específicos implicaba la necesidad de formular una nueva mecánica, que debía de fundamentarse en el reconocimiento de las «condiciones cuánticas», donde los fenómenos atómicos y moleculares encontrasen una explicación satisfactoria¹⁰⁷.

El nacimiento de la Física Atómica

Rutherford comprobó, al estudiar las propiedades ionizantes de la radiación emitida por las sales de uranio, que la radiación estaba era de dos tipos diferentes, una de ellas la denominó *radiación alpha* (*a*), que se caracterizaba por la facilidad con que era absorbida por la materia; la otra, que llamó *radiación beta* (*b*), tenía un mayor poder de penetración en la materia. Las propiedades y la naturaleza de estos dos nuevos tipos de radiación eran tan desconocidos como lo habían sido para Roentgen los rayos X. Rutherford encaminó sus esfuerzos investigadores a determinar la naturaleza de dicha radiación. En esas fechas Marie Curie, Henri Becquerel y otros investigadores habían desvelado la naturaleza de la *radiación beta*, ésta no era sino una corriente de electrones que se movían a grandes velocidades, próximas a la de la luz. Sin embargo, la naturaleza de la *radiación alpha* continuaba siendo un misterio. Debieron transcurrir diez largos años hasta que identificó en 1911 a las *partículas alfa* como átomos de helio con carga positiva (mejor habría que decir núcleos de Helio). Se había descubierto el núcleo del átomo. En paralelo a su investigación sobre la naturaleza de la radiación alfa, Rutherford estaba inmerso en la elaboración de una teoría general de la radiactividad. Rutherford y Soddy establecieron en 1903 la primera teoría general de la radiactividad. Quedaba así despejada la incógnita sobre el origen de la energía liberada por el átomo a través de la radiactividad. Habían establecido que la desintegración radiactiva era producto de una transformación interna del átomo, pero se desconocía que provocaba dicho cambio.

¹⁰³ KUHN, Th. S.: *La teoría del cuerpo negro...*, *op. cit.*, pp. 219-220.

¹⁰⁴ *Ibidem*, p. 236.

¹⁰⁵ EINSTEIN, Albert: «Die Plancksche Theorie der Strahlung und die Theorie der spezifischen Wärme», en *Annalen der Physik*, ser. 4, vol. 22, 1907, pp. 180-190.

¹⁰⁶ KUHN, Th. S.: *La teoría del cuerpo negro...*, *op. cit.*, p. 247.

¹⁰⁷ *Ibidem*, p. 252. SÁNCHEZ RON, José Manuel: *Historia de la física cuántica...*, *op. cit.*

El modelo atómico de Rutherford se asemejaba a un sistema planetario, donde los electrones, de carga negativa, se movían alrededor del núcleo, de carga positiva, describiendo órbitas elípticas, aunque dicho modelo presentaba numerosas ventajas frente al de Thomson, no dejaba de plantear importantes problemas¹⁰⁸. El electrón según el modelo de Rutherford el electrón debía emitir de forma constante radiación y, por tanto, los átomos debían emitir radiación electromagnética de manera continua, cosa que no sucedía. Además, si el electrón emitía radiación continuamente se produciría una pérdida paralela de energía, de tal manera que el electrón conforme perdiese energía iría disminuyendo el radio de su órbita hasta caer en el núcleo¹⁰⁹. Hasta entonces los modelos atómicos desarrollados se habían fundamentado en la física clásica, la solución de las dificultades subyacentes en el modelo de Rutherford sólo comenzaron a encontrar solución cuando Niels Bohr aplicó los principios de la teoría cuántica de Planck¹¹⁰.

Bohr centró su atención en los problemas teóricos que subyacían en el modelo de Rutherford, dichas dificultades tenían una similitud con el fenómeno de la *catástrofe del ultravioleta* para el caso de la radiación. Bohr se interrogó si no ocurriría algo similar en el interior del átomo, los trabajos de Ehrenfest y, sobre todo, de Einstein de 1905 y 1909 habían puesto de manifiesto que la distribución discontinua de energía no era algo restringido al fenómeno de la radiación. De

¹⁰⁸ ANDRADE, Edward Neville da Costa: *Rutherford and the Nature of the Atom*, New York, Anchor Book, Doubleday & Company, Inc., 1964; BIRKS, John Betteley (ed.): *Rutherford at Manchester*, New York, W.A. Benjamin Inc., 1963; EVE, A. S.: *Rutherford*, London, Cambridge University Press, 1939; ROBINSON, H. R.: *Rutherford by those Who knew Him*. The Physical Society, London, 1954; BOORSE, H. A. y MOTZ, L.: *The World of the Atom*; HURD, D. L. y KIPLING, J. J.: *The origins and Growth of Physical Science*, vol. II; HAAR, D. der: *The Old Quantum Theory* (reimpresión artículos de Rutherford); ROMER, A.: *The Discovery of the Radioactivity and Transmutation*, New York, Dover Publications, 1964 y *Radiochemistry and the Discovery of Isotopes*, New York, Dover Publications, 1970 (ambas obras contienen una selección de artículos originales de la época con comentarios del autor); TRENN, Thaddeus J.: «Rutherford and the Alpha-Beta-Gamma Classifications of Radioactive Rays», *Isis* 67, 1976, pp. 61-75; FREEDMAN, Michael I.: «Frederik Soddy and the Practical Significance of Radioactive Matter», en *British Journal for the History of Science*, 12, 1979, pp. 257-260; TRENN, Thaddeus J.: «The Central Role of Energy in Soddy's Holistic and Critical Approach to Nuclear Science, Economics, and Social Responsibility», en *British Journal for the History of Science*, 12, 1979, pp. 261-276. SHIRE, E.: *Rutherford y el átomo nuclear*, Madrid, Pearson, 1980. SÁNCHEZ RON, J. M.: *Historia de la física cuántica...*, op. cit.

¹⁰⁹ BOHR, Niels: *Nuevos ensayos sobre física atómica...*, op. cit., p. 42.

¹¹⁰ HEILBRON, John L.: *A History of the Problem of Atomic Structure from the Discovery of the Electron to the Beginning of Quantum Mechanics*. Tesis Doctoral. University of California, Berkeley, 1964; KELLER, Alex : *The Infancy of Atomic Physics. Hercules in His Cradle*, Clarendon Press, Oxford, 1983; WEINER, Charles (ed.): *Exploring the History of Nuclear Physics*, American Institute of Physics, Nueva York, 1972; NISIO, Sigeko : «X-Ray, and Atomic Structure at the Early Stages of the Old Quantum Theory», *Japanese Studies in the History of Science*, 8, 1975, pp. 55-75; HIROSIGE, Tetu y NISIO, Sigeko: «Formation of Bohr's Theory of Atomic Constitution», *Japanese Studies in the History of Science*, 3, 1964, pp. 6-28; HEILBRON, John L. y KUHN, Thomas S.: «The Genesis of the Bohr Atom», *Historical Studies in the Physical Sciences*, 1, 1969, pp. 211-290; HIROSIGE, Tetu y NISIO, Sigeko: «The Genesis of the Bohr Atom Model and Planck's Theory of Radiation» *Japanese Studies in the History of Science*, 9, 1970, pp. 36-47.

hecho entre 1910 y 1912 la discontinuidad se había abierto camino entre los físicos, y el problema de los calores específicos había ampliado notablemente su campo de aplicación. Bohr conocía tales investigaciones y se preguntó sino sería posible extender tales resultados al comportamiento de los electrones en el interior del átomo, de manera que introduciendo restricciones en la emisión y absorción de energía del átomo se eliminarían las dificultades subyacentes en el modelo de Rutherford¹¹¹.

Bohr dio una explicación de la configuración del espectro de líneas del hidrógeno, algo que habían perseguido los físicos durante cerca de treinta años.¹¹² Pero su contribución rebasaba con mucho tal logro. Bohr había conseguido resolver la dificultad del modelo atómico de Rutherford, explicando el por qué el átomo no emitía radiación de forma continua y los electrones no se precipitaban sobre el núcleo, sino que permanecían en órbitas estacionarias. Para ello, eso sí, tuvo que arrojar por la borda la teoría clásica y recurrir al cuanto de acción de Planck. Como contrapartida se obtenía una teoría del átomo que no contenía en sí misma elementos que la hiciesen inviable¹¹³. Como señaló el propio Bohr, en su teoría de 1913 «el postulado cuántico... afirma que cualquier cambio en la energía intrínseca del átomo consiste en una transición completa entre dos estados estacionarios», esto significaba que las transiciones entre los diferentes estados energéticos del átomo se producían mediante *saltos discontinuos* regidos por el cuanto de Planck, algo que resultaba absolutamente incompatible con la teoría clásica que postulaba transiciones continuas de un estado de energía a otro. La dificultad se veía agravada por el recurso en la misma teoría a los principios de la mecánica y del electromagnetismo clásicos a la hora de la definición de la carga y de la masa del electrón y del núcleo. La utilización dentro de la misma teoría de dos teorías, la clásica y la cuántica, incompatibles entre sí generaba enormes dificultades teóricas, para solventar dicho problema Bohr recurrió al establecimiento del *principio de correspondencia* que posteriormente desembocó en el *principio de complementariedad*.

La situación era lo suficientemente contradictoria como para que numerosos físicos no aceptaran en un principio dicho modelo atómico. Sólo cuando las pruebas experimentales, a raíz de los trabajos de Frank y Hertz en 1914, Millikan en 1916 y Compton en 1922, hicieron incuestionable la teoría cuántica de Bohr, el nuevo modelo atómico tuvo que ser admitido, aunque las reticencias y las dificultades no desaparecieron hasta el establecimiento de la mecánica cuántica en 1925-27¹¹⁴.

¹¹¹ BOHR, Niels: *Nuevos ensayos sobre física atómica y conocimiento humano*, Madrid, Aguilar, 1970, pp. 42-43.

¹¹² BOHR, Niels: «On the Constitution of Atoms and Molecules», en *Philosophical Magazine*, 26, I, 1913, p. 476 y ss. BOHR, Niels: *Nuevos ensayos sobre física atómica...*, op. cit., p. 46.

¹¹³ Ibidem, p. 47.

¹¹⁴ BORN, Max: *Atomic Physics*, 6ª ed., Blackie, Glasgow, 1957; JAMMER, Max: *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, New York, McGraw-Hill, 1973; MEHRA, Jagdish y

La determinación de las *reglas de cuantización* constituía el problema central de la teoría. La solución al mismo se obtenía mediante un proceso intuitivo, se postulaban determinadas reglas y se comparaban los espectros de magnitudes cuantizadas con los resultados experimentales. La primera teoría cuántica se encontraba con un problema que ya había sido planteado en 1905 por Einstein en su artículo sobre el efecto fotoeléctrico: la dualidad existente entre el comportamiento ondulatorio y corpuscular de la luz. El interrogante planteado podría ser resumido en: ¿cómo conciliar la discontinuidad de la estructura de la luz y del átomo con la teoría ondulatoria, de naturaleza continua por excelencia, cuya aplicación se hacía también necesaria para comprender la naturaleza de la luz y el comportamiento de determinados fenómenos en el interior del átomo, como es el caso del fenómeno de dispersión? La solución a dicho dilema parecía poco menos que imposible, a la vista de la incompatibilidad existente entre los presupuestos epistemológicos de ambas teorías.

Hacia 1923 era casi evidente que la teoría de Bohr y la antigua teoría de los cuantos constituían solamente un estado intermedio entre las concepciones clásicas y concepciones muy nuevas que permiten penetrar más profundamente en el análisis de los fenómenos cuánticos. En la antigua teoría de los cuantos las condiciones de cuantificación eran en cierto modo superpuestas sobre los resultados de la mecánica clásica. La naturaleza esencialmente discontinua de la cuantificación,... presentaba un extraño contraste con la naturaleza continua de los movimientos considerados por la dinámica antigua, newtoniana o einsteiniana. Era necesario, evidentemente, llegar a construir una nueva mecánica en la que las ideas cuánticas vinieran a colocarse en la base misma de la doctrina y no a superponerse de un modo forzado como en la antigua teoría de los cuantos.¹¹⁵

Einstein propugnó en 1917¹¹⁶ una nueva deducción de la fórmula de radiación de Planck, en la que el concepto clásico de intensidad de la radiación era sustituido por el concepto estadístico de probabilidad de transición de un estado estacionario a otro, que significó un importante progreso en el desarrollo de la

RECHENBERG, Helmut: *The Historical Development of Quantum Theory*, vol. I, *The Quantum Theory of Planck, Einstein, Bohr and Sommerfeld: Its Foundation and the Rise of Its Difficulties: 1900-1925*, 2 vols., New York, Springer-Verlag, 1982; HUND, Friedrich : *The History of Quantum Theory*, London, George G. Harrap, 1974; WHITTAKER, Edmund : *A History of the Theories of Aether and Electricity*, vol. II: *The Modern Theories, 1900-1926*, Edimburg, Thomas Nelson, 1953, reimpresión en New York, Humanities Press, 1973; RAMUNNI, Girolama: *Les conceptions quantiques de 1911 à 1927*, Paris, Vrin, 1981. SÁNCHEZ RON, José Manuel: *Historia de la física cuántica...*, op. cit.. OTERO CARVAJAL, Luis Enrique: *La crisis de la Modernidad. La quiebra de la representación determinista*, op. cit.. JAMMER, Max: *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, New York, McGraw-Hill, 1966, p. 87.

¹¹⁵ BROGLIE, Louis de: *La física nueva y los cuantos*, Buenos Aires, Losada, 1965, p. 143. 1ª edición *La Physique Nouvelle et les Quanta*, Paris, Flammarion, 1937. HEISENBERG, Werner: «Los comienzos de la mecánica cuántica en Gotinga», en HEISENBERG, Werner: *Ensayos y conversaciones con Einstein y otros ensayos*, Alianza, Madrid, 1985, p. 48.

¹¹⁶ EINSTEIN, Albert: «Quantentheorie der Strahlung», en *Phisikalische Zeitschrift*, vol. 18, 1917, pp. 121-128.

teoría cuántica¹¹⁷. Einstein finalizaba su artículo «*Quantentheorie der Strahlung*» con unas palabras premonitorias: «Estos aspectos de los procesos elementales parece que hacen casi inevitable el desarrollo de una teoría propiamente cuántica de la radiación. Su debilidad reside en el hecho de que, de un lado, no nos ofrece conexión más estrecha con los conceptos ondulatorios, y de otro, deja al azar el instante y la dirección de los procesos elementales; no obstante, tengo plena confianza de que nos encontramos en el buen camino.»¹¹⁸ Sin embargo, las investigaciones sobre dispersión y difusión de la luz, realizadas entre 1921 y 1925 por Landenburg, Kramers y Heisenberg, en colaboración con el segundo, pusieron de manifiesto que la formulación introducida por Einstein en 1917 de la probabilidad de transición, basada en la Mecánica estadística, resultaba insuficiente para explicar la intensidad de una onda¹¹⁹.

En 1924 Kramers estableció una fórmula general de dispersión que dependía sólo de las energías de los estados estacionarios y de las probabilidades de transición espontánea entre los mismos, para ello se basó en la formulación de Einstein de las leyes estadísticas para predecir las transiciones inducidas por radiación entre estados estacionarios de un sistema atómico¹²⁰. El estudio de los fenómenos de dispersión condujo de manera directa a Heisenberg a formular el *principio de incertidumbre* y con él a eliminar el concepto de órbita electrónica, iniciando lo que propiamente puede ser denominada *segunda teoría cuántica* o *Mecánica Cuántica*.

La publicación en 1925 del artículo de Werner Heisenberg «*Über quantentheoretische Undeutung Kinematischer und Mechanischer Beziehungen*»¹²¹ representó un notable avance para la resolución de las dificultades que aquejaban a la antigua teoría de los cuantos, al proponer un nuevo enfoque de los problemas

¹¹⁷ BOHR, Niels: «Discusión con Einstein sobre problemas epistemológicos de la física atómica», publicado originalmente en inglés en la obra colectiva en homenaje a Einstein: *Albert Einstein: Philosopher - Scientist*, P.A. Schilpp (ed.), pp. 199-243, reproducido en castellano en: N. Bohr: *Física atómica y conocimiento humano*, Aguilar, Madrid, 1964, pp. 40-82, cita p. 44.

¹¹⁸ EINSTEIN, Albert: «Quantentheorie der Strahlung», en *Physikalische Zeitschrift*, vol. 18, 1917, pp. 127-128.

¹¹⁹ WAERDEN, Bartel Leendert van der: *Sources of quantum mechanics*, Amsterdam, North-Holland, 1967, también en New York, Dover, 1968; HUND, Friedrich: *Geschichte der Quantentheorie*, Mannheim, 1967, existe edición en inglés bajo el título: *The History of Quantum Theory*, London, George G. Harrap, 1974; JAMMER, Max: *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, New York, McGraw-Hill, 1966; MEHRA, Jagdish y RECHENBERG, Helmut: *The Historical Development of Quantum Theory*, vol. I: *The Quantum Theory of Planck, Einstein, Bohr and Sommerfeld: Its Foundation and the Rise of Its Difficulties, 1900-1925*; vol. II: *The Discovery of Quantum Mechanics, 1925*, New York, Springer-Verlag, 1982; RAMUNNI, Girolama: *Les conceptions quantiques de 1911 à 1927*, Vrin, Paris, 1981.

¹²⁰ KRAMERS, Hendrik Anthony en la revista *Nature*, nº 113, 1924.

¹²¹ HEISENBERG, Werner: «Über quantentheoretische Undeutung Kinematischer und mechanischer Beziehungen», en *Zeitschrift für Physik*, vol. 33, 1925, pp. 879-893, reimpresso en *Dokumente der Naturwissenschaft*, Battenberg, Stuttgart, 1962, vol. II, pp. 31-45, y en inglés en WAERDEN, B.L. van der: *Sources of Quantum Mechanics, op. cit.*, New York, Dover, 1967, bajo el título: «Quantum theoretical reinterpretation of Kinematic and mechanical relations», pp. 261-276.

analizados por Kramers. Heisenberg sostuvo que era preciso abandonar el concepto de órbitas electrónicas precisas, en función de su carácter inobservable. A partir de este postulado Heisenberg desarrolló un formalismo matemático que desembocó de forma inmediata, gracias al concurso de M. Born, P. Jordan y P. A. M. Dirac junto con Heisenberg, en la nueva mecánica cuántica¹²². El punto de vista heurístico por el que Heisenberg había llegado a la convicción de que era preciso abandonar el concepto de órbita electrónica, fue inspirado en la posición adoptada por Einstein en el artículo de 1905 en el que exponía la Teoría de la Relatividad Especial¹²³. Paralelamente al trabajo de Born, Heisenberg y Jordan, W. Pauli analizó el caso del hidrógeno bajo la perspectiva de la nueva mecánica cuántica, obteniendo unos resultados que se mostraban en plena concordancia con los resultados experimentales. El trabajo de Pauli constituyó un fuerte espaldarazo para la nueva teoría¹²⁴.

La interpretación ondulatoria de la Mecánica Cuántica

El descubrimiento del efecto Compton en 1922 había inclinado sin lugar a dudas el fiel de la balanza en favor de la teoría de Einstein de 1905 sobre la naturaleza de la luz, asimismo en esa época se atisbaba que dicho dualismo no era un fenómeno exclusivo de los fotones sino que afectaba incluso al comportamiento de los electrones, fue Louis de Broglie quien explicitó en primer lugar tan extraña y contradictoria propiedad para la Física de la época.

En esta época [1923-1924] el descubrimiento del efecto Compton y el estudio del efecto fotoeléctrico de los rayos X acababan de aportar notables confirmaciones a la concepción einsteiniana de los cuantos de luz. La estructura discontinua de las radiaciones y la existencia de los fotones no podía ser ya discutida. Desde entonces se planteaba con intensidad extraordinaria el temible dilema de las ondas y de los corpúsculos en lo que se refiere a la luz. Había que admitir de buen o mal grado que la imagen de las ondas y la imagen de los corpúsculos debían ser, alternativamente, utilizadas para la descripción completa de las propiedades de las radiaciones y la relación entre frecuencia y energía que Einstein había colocado en la base de la teoría de los fotones indicaba claramente que esta dualidad de aspecto de las radiaciones estaba íntimamente vinculada a

¹²² BORN, Max y JORDAN, Pascual: *Zeitschrift für Physik*, vol. 34, 1925, p. 858 y ss. Sobre este trabajo de Born y Jordan, HEISENBERG, Werner: «Los comienzos de la mecánica cuántica en Gotinga», en *Encuentros y conversaciones con Einstein y otros ensayos*, op. cit., pp. 53-54. BORN, M., HEISENBERG, W. y JORDAN, P.: *Zeitschrift für Physik*, 35, 1926, p. 557 y ss. BORN, Max: «La interpretación estadística de la Mecánica cuántica...», en M. y H. BORN: *Ciencia y conciencia en la era atómica*, Madrid, Alianza, 1984, p. 104.

¹²³ HEISENBERG, Werner: «Encuentros y conversaciones con Albert Einstein», en *Encuentros y conversaciones con Einstein y otros ensayos*, op. cit., p. 121.

¹²⁴ PAULI, Wolfgang: *Zeitschrift für Physik*, vol. 36, 1926, p. 336. BORN, M.: «La interpretación estadística de la Mecánica cuántica», en M. y H. BORN: *Ciencia y conciencia en la era atómica*, op. cit., p. 106.

la existencia misma de los cuantos. Desde entonces se podía preguntar muy legítimamente si esta extraña dualidad de las ondas y de los corpúsculos, ..., no traducían en el plano de los fenómenos la naturaleza profunda y oculta del quantum de acción y si no debía esperarse que se volviera a hallar una dualidad del mismo orden en todas las partes en que la constante de Planck manifestase su presencia... Puesto que la existencia de los estados estacionarios para los átomos demuestra la intervención del cuanto de acción en las propiedades del electrón, ¿no debe suponerse que el electrón presenta una dualidad de aspecto análogo a la de la luz? A primera vista semejante idea parecía muy arriesgada, pues hasta allí el electrón se había mostrado siempre enteramente asimilable a un punto material cargado eléctricamente y obedeciendo las leyes de la dinámica clásica... Atribuir al electrón, en ausencia de toda prueba experimental, propiedades ondulatorias, podía parecer una fantasía de carácter poco científico.¹²⁵

El trabajo de L. de Broglie¹²⁶ encontró pronto una brillante confirmación en los estudios de Davisson, Germer, Elsassser y George Thomson y Reid sobre la dispersión selectiva que sufren los electrones en los cristales¹²⁷. Einstein se mostró de inmediato interesado por el trabajo de De Broglie, publicando tres artículos en los que ponía en relación la teoría de De Broglie con la teoría de la degeneración de los gases de Bose¹²⁸. Einstein llamó la atención sobre ello a Max Born¹²⁹.

La situación en el otoño de 1925 no podía dejar de ser más confusa. Por una parte, el desarrollo de la nueva mecánica cuántica por Heisenberg, Born y Jordan ofrecía una teoría que resolvía matemáticamente los problemas que habían aquejado a la primera teoría cuántica, mediante la formulación de una nueva mecánica que cuestionaba profundamente los fundamentos de la mecánica clásica; pero, y esto es importante, la nueva teoría se basaba en la consideración corpuscular del electrón, obviando su *posible* comportamiento ondulatorio. Por otra parte, la teoría de De Broglie postulaba la naturaleza dual, corpúsculo-onda, del electrón. De esta forma, dos teorías que en principio parecían radicalmente contradictorias daban cuenta de fenómenos similares. La aparición de los trabajos de Erwin Schrödinger durante los primeros meses de 1926 no hicieron sino complicar apa-

¹²⁵ BROGLIE, Louis de: *La física nueva y los cuantos*, op. cit., pp. 144-145.

¹²⁶ BROGLIE, Louis de: *Thèses*, Paris, 1924; *Annales de Physique*, 10, 2, 1925; *Nature*, 112, 1923, p. 540 y ss.

¹²⁷ ELSASSER, W.: *Naturwissenschaften*, vol. 13, 1925, p. 711 y ss.; DAVISSON, C. J. y GERMER, L. H.: *Physical Review*, 30, 1927, p. 707 y ss.; THOMSON, G. P. y REID, A.: *Nature*, 119, 1927, p. 890; THOMSON, G. P.: *Proceedings of the Royal Society of London A*, 117, 1928, p. 600. Broglie, L. de: *La física nueva y los cuantos*, pp. 147-148.

¹²⁸ EINSTEIN, Albert: «Quantentheorie des einatomigen idealen Gases», *Preussische Akademie der Wissenschaften, Phys.-math. Klasse, Sitzungsberichte*, 1924, pp. 261-267; EINSTEIN, Albert: «Quantentheorie des einatomigen idealen Gases. 2. Abhandlung», *Preussische Akademie der Wissenschaften, Phys.-math. Klasse, Sitzungsberichte*, 1925, pp. 3-14; y: «Quantentheorie des idealen Gases», *Preussische Akademie der Wissenschaften, Phys.-math. Klasse, Sitzungsberichte*, 1925, pp. 18-25.

¹²⁹ Carta dirigida por M. Born a Einstein, fechada en Gotinga el 15 de julio de 1925, recogida en A. Einstein-M. y H. Born: *Correspondencia (1916-1955)*. México, Siglo XXI, 1973, pp. 109-113.

rentemente la situación, hasta que se comprobó la equivalencia de las ecuaciones y resultados de la mecánica cuántica y de la mecánica ondulatoria¹³⁰.

Schrödinger en sus trabajos de enero de 1926 «*Quantisierung als Eigenwertproblem*» desarrolló los fundamentos de la *mecánica ondulatoria*. En un artículo de febrero de 1926 publicado llamó la atención, no sin cierta sorpresa, sobre las analogías formales de su teoría con la mecánica cuántica de Heisenberg-Born-Jordan¹³¹. Schrödinger sostuvo que la mecánica ondulatoria proporcionaba una interpretación de los fenómenos atómicos que permitía eliminar el concepto de *salto cuántico* y con él la discontinuidad en los procesos atómicos. En su interpretación de la mecánica ondulatoria, Schrödinger concebía la función de onda (ψ) de su ecuación desde la perspectiva de la teoría clásica de la radiación electromagnética. El hecho de que los resultados obtenidos de esta manera coincidieran con los resultados de la mecánica cuántica resolvía de una manera mucho más sencilla el problema del modelo del átomo de hidrógeno, por lo que otorgaron una gran audiencia a la interpretación clásica de Schrödinger, pues eliminaba el *contrasentido* de los saltos cuánticos que amenazaba a todo el edificio de la Física moderna¹³².

Dicha interpretación fue contestada desde Copenhague y Gotinga, tanto Bohr como Heisenberg y Born sostuvieron que no era posible sostenerla en fun-

¹³⁰ BORN, Max: «La interpretación estadística de la Mecánica cuántica», en M. y H. Born: *Ciencia y conciencia en la era atómica*, pp. 106-107.

¹³¹ SCHRÖDINGER, Erwin: «Quantisierung als Eigenwertproblem», en *Annalen der Physik*, vol. 79, 1926, pp. 361-376; reimpresso en SCHRÖDINGER, Erwin: *Abhandlungen zur Wellenmechanik*, Leipzig, Barth, 1926, 1928, pp. 1-16. Existe traducción al inglés en E. Schrödinger: *Collected Papers on Wave Mechanics*, London, Blackie & Son, 1928, bajo el título «Quantization as a problem of proper values», pp. 1-12 y LUDWIG, G.: *Wave Mechanics*, Oxford, Pergamon Press, 1969, bajo el título «Quantization as an Eigenvalue-problem», pp. 94-105; traducción al francés: SCHRÖDINGER, Erwin: *Mémoires sur la Mécanique Ondulatoire*, Paris, Alcan, 1933, pp. 1-19; SCHRÖDINGER, Erwin: «Quantisierung als Eigenwertproblem», en *Annalen der Physik*, vol. 79, 1926, p. 489 y ss.; SCHRÖDINGER, Erwin: «Über das Verhältnis der Heisenberg-Born-Jordanschen Quantenmechanik zu der meinen», en *Annalen der Physik*, vol. 79, 1926, pp. 734-756; Schrödinger continuo desarrollando su teoría en la revista *Annalen der Physik*, vol. 80, 1926, p. 437; y vol. 81, 1926, p. 109. Born, junto con Norbert Wiener, había escrito a finales de 1925 una nueva formulación matemática de la mecánica cuántica que pudo, como después se comprobó, haber conducido con facilidad al formalismo de Schrödinger de la mecánica ondulatoria, algo a lo que no llegaron, BORN, M. y WIENER, N.: *Zeitschrift für Physik*, vol. 36, 1926, p. 174 y ss. BORN, Max: «La interpretación estadística de la Mecánica cuántica (...)» reproducido en M. y H. BORN, *op. cit.*, p. 108.

¹³² WESSELS, Linda: *Schrödinger's Interpretations of Wave Mechanics*. Tesis doctoral. Indiana University, 1975; WESSELS, Linda: «Schrödinger's Route to Wave Mechanics», *Studien in History and Philosophy of Science*, 10, 1977, pp. 311-340; WESSELS, Linda: «The Intellectual Sources of Schrödinger's Interpretations» *Studien in the Foundations of Quantum Mechanics*, P. Suppes ed., Philosophy of Science Association, 1980, pp. 59-76; KRAGH, Helge: «Erwin Schrödinger and the Wave Equation: The Crucial Phase», *Centaurus*, 26, 1982, pp. 154-197; SCOTT, William T.: *Erwin Schrödinger. An Introduction to His Writings*, Amherst, University of Massachusetts Press, 1967; MAC-KINNON, Edward: «The Rise and Fall of the Schrödinger's Interpretation», *Studies in the Foundations of Quantum Mechanics*, P. Suppes ed. Philosophy of Science Association, 1980. SÁNCHEZ RON, José Manuel: *Historia de la física cuántica...*, *op. cit.*

ción del contenido matemático de la ecuación de ondas. Esta cuestión fue posteriormente aclarada por Born con la publicación, el mismo año 1926, de la interpretación probabilista de la mecánica ondulatoria y su naturaleza equivalente con la mecánica cuántica, al señalar que el cuadrado de la función de ondas sólo determina la probabilidad de encontrar al electrón en una posición del espacio, no siendo posible una determinación exacta de la posición del electrón¹³³. Para ello, Born partió de una idea original de Einstein¹³⁴ al estudiar el comportamiento del choque de electrones con un átomo, en una serie de tres artículos publicados en 1926, titulados «*Mecánica cuántica y procesos de colisión*»¹³⁵. Born sostenía que en los procesos individuales no era posible determinar con exactitud el estado de la partícula después de la colisión, sino que sólo podía establecerse la probabilidad del estado de la partícula después de la colisión. La interpretación probabilista de la mecánica cuántica realizada por Max Born, complementada por la teoría de transformación de Dirac y Jordan¹³⁶, constituyó un avance sustancial en la comprensión del significado de la nueva mecánica cuántica, al establecer su carácter probabilístico¹³⁷.

Como había señalado Einstein en su discusión con Heisenberg, mantenida en la primavera de 1926, la nueva teoría cuántica había renunciado al concepto de órbita electrónica, ahora bien, entonces ¿cómo explicar las trazas que los electrones dejaban en la cámara de niebla?, ¿no representaban acaso la trayectoria de éstos?, y si esto era así, ¿no significaba que existían órbitas electrónicas? Los interrogantes suscitados por Einstein tenían un alcance profundo y afectaban al conjunto de la teoría, urgía, pues, encontrar una respuesta satisfactoria. El problema planteado por Einstein remitía a la cuestión central del significado físico del concepto de *estado*¹³⁸. La respuesta a este interrogante trajo como consecuencia la formulación del *Principio de Incertidumbre* y el establecimiento de las *relaciones de incertidumbre* por parte de Heisenberg en 1927.

¹³³ HEISENBERG, Werner: «La evolución de los conceptos en la historia de la mecánica cuántica», en *Encuentros y conversaciones con Einstein y otros ensayos*, p. 33-34. BOHR, Niels: «La génesis de la mecánica cuántica», en BOHR, Niels: *Nuevos ensayos sobre física atómica...*, op. cit., p. 94.

¹³⁴ BORN, Max: «La interpretación estadística de la Mecánica cuántica (...)», en M. y H. BORN: *Ciencia y conciencia en la era atómica*, op. cit., p. 108.

¹³⁵ BORN, Max: «Zur Quantenmechanik der Stossvorgänge», en *Zeitschrift für Physik*, vol. 37, 1926, pp. 863-867; BORN, Max: «Zur Quantenmechanik der Stossvorgänge», *Zeitschrift für Physik*, vol. 38, 1926, pp. 803-827; y BORN, Max: «Zur Wellenmechanik der Stossvorgänge», *Göttinger Nachrichten, Mathem.-Phys., Klasse*, 1926, pp. 146-160 reimpresos en BORN, Max: *Ausgewählte Abhandlungen*, Göttingen, Vandenhoeck & Ruprecht, 1963, vol. II, pp. 228-232; pp. 233-257; y pp. 284-298.

¹³⁶ DIRAC, Paul Adrien Maurice: *Proceedings of the Royal Society of London A*, vol. 110, 1926, p. 561; vol. 111, 1926, p. 281 y vol. 112, 1926, p. 674. BOHR, Niels: *Nuevos ensayos sobre física atómica...*, p. 70.

¹³⁷ EISBERG, Robert y RESNICK, Robert: *Física cuántica*, México, Limusa, 1986, pp. 169-170.

¹³⁸ HEISENBERG, Werner: «La evolución de los conceptos en la historia de la mecánica cuántica», en *Encuentros y conversaciones con Einstein y otros ensayos*, p. 35.

El Principio de Incertidumbre de Heisenberg

En su artículo «*Über des anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik*» (*El contenido intuitivo de la cinemática y mecánica cuánticas*), publicado en 1927¹³⁹, Werner Heisenberg estableció las *relaciones de incertidumbre* como un principio físico fundamental, al postular que no es posible conocer simultáneamente la posición y el impulso de una partícula (electrón). Si la interpretación estadística de la mecánica cuántica (y dentro de ella también de la mecánica ondulatoria) desarrollada por Max Born constituía una profunda ruptura con los conceptos y los fundamentos epistemológicos de la Física moderna; las *relaciones de incertidumbre* profundizaron el alcance de dicha fractura al romper radicalmente con la antigua pretensión de la Física moderna¹⁴⁰. Sostener que no es posible *físicamente* conocer simultáneamente con exactitud determinista la posición y el impulso de cualquier clase de partícula elemental constituía una verdadera herejía respecto de los presupuestos epistemológicos de la Física moderna.

El principio de incertidumbre dio lugar al surgimiento de nuevos e importantes problemas filosóficos, que no se planteaban en la mecánica clásica. Como veremos, estos problemas contribuyeron a que los físicos decidieran renunciar al concepto de causalidad en el dominio atómico, adoptando así un punto de vista filosófico muy diferente al que había prevalecido hasta el advenimiento de la moderna teoría cuántica. Para poder apreciar el papel que desempeñó el principio de incertidumbre al ayudar a renunciar a la causalidad, recordemos que en la mecánica clásica son justamente los valores iniciales y los ritmos iniciales de cambio de todas las variables mecánicas, que definen el estado de un sistema dado, los que determinan los movimientos futuros del sistema en cuestión. Sin embargo, de acuerdo con el principio de incertidumbre, existe una limitación fundamental, derivada de las mismas leyes de la naturaleza en el nivel mecánico cuántico, que nos hace imposible obtener los datos necesarios para especificar en forma completa los valores iniciales de los diversos parámetros que determinan el comportamiento de dicho sistema mecánico.¹⁴¹

No debe extrañar que la polémica surgida a raíz del desarrollo de la teoría cuántica se agudizase. Sus oponentes, entre los que se encontraba Einstein, no podían dejar de reconocer la validez de la nueva mecánica cuántica, pero a la vez no renunciaban a la esperanza de que un día dicha teoría y sus heréticos fundamentos fuesen sustituidos por una nueva teoría física, que restableciese los principios y presupuestos que la mecánica cuántica había osado derribar¹⁴². De una

¹³⁹ HEISENBERG, Werner: «Über der anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik», en *Zeitschrift für Physik*, 43, 1927, pp. 172-198.

¹⁴⁰ LAPLACE, Pierre Simon: *Ensayo filosófico sobre las probabilidades*, Madrid, Alianza, 1985, p. 25.

¹⁴¹ BOHM, David: *Causalidad y azar en la física moderna*, México, Universidad Nacional Autónoma de México, 1959, p. 128, 1ª ed. en inglés en 1957.

¹⁴² MESSIAH, Albert: *Mecánica Cuántica*, 2 vols., Madrid, Tecnos, 1975, vol. I, p. 3.

parte, se situaron los fundadores de la Mecánica cuántica: N. Bohr, M. Born, W. Heisenberg, P. A. M. Dirac, W. Pauli, etc., de otra parte sus detractores encabezados por A. Einstein, M. Planck, L. de Broglie y E. Schrödinger. El problema no se situaba en la renuncia o reformulación de tal o cual ley física por fundamental que esta fuese; el significado profundo, las consecuencias epistemológicas del Principio de Heisenberg, alcanzaba de lleno al corazón mismo de lo que había sido la Física desde los tiempos de Newton. Como señaló Niels Bohr lo que había quebrado con el *Principio de Incertidumbre* de Heisenberg era la vieja pretensión determinista, fundamentada en el *concepto clásico de causalidad*¹⁴³.

La polémica Einstein-Bohr

La posición de Planck en 1929 respecto de la nueva mecánica cuántica no podía dejar de ser negativa, en conformidad con su adhesión a los postulados fundamentales de la Física clásica, en *La imagen del mundo en la física moderna* explicitó su oposición a dicha interpretación:

A pesar de estos éxitos manifiestos, la relación de incertidumbre característica de la física cuántica ha suscitado las reticencias entre numerosos sabios, sobre todo del hecho de que la definición de las magnitudes, constantemente utilizadas en los cálculos, aparece en un cierto sentido como inexacta por principio. Y la introducción del concepto de probabilidad en la interpretación de las ecuaciones cuánticas acrecienta todavía más el malestar. Esta noción, en efecto, parece acarrear el abandono de la causalidad rigurosa en provecho de un cierto indeterminismo. Existen efectivamente en nuestros días físicos eminentes que se inclinan a excluir la noción de causalidad rigurosa del mundo de la física. Si una evolución tal llega a revelarse necesaria, la ambición de la investigación física se encontrará de golpe sensiblemente reducida. Porque, *en mi opinión, si uno tiene que elegir, el determinismo debe ser preferido en todos los casos al indeterminismo, por la simple razón de que una respuesta determinada a una cuestión será siempre más preciosa que una respuesta indeterminada.*[cursivas añadidas]¹⁴⁴.

Una posición similar mantuvo Albert Einstein a partir de 1920. Al igual que Planck los trabajos de Einstein de 1905, 1909 y 1917, por sólo citar algunos de los más importantes, habían sido fundamentales en el desarrollo de la teoría cuántica. Las ra-

¹⁴³ BOHR, Niels: «Física cuántica y filosofía. Causalidad y complementariedad», reproducido en *Nuevos ensayos sobre física atómica y conocimiento humano*, op. cit., p. 3.

¹⁴⁴ PLANCK, Max: *L'image du monde dans la physique moderne*, Genève, Suisse, Gonthier, 1963, p. 24, primera edición en alemán *Vorträge und Erinnerungen*, Stuttgart, Hirzel Verlag, 1949, recopilación de artículos de Planck. Conferencia pronunciada el 18 de febrero de 1929 en el Instituto de Física de la Universidad de Leyden. Ocho años después, Planck pronunció otra conferencia, el 4 de diciembre de 1937, bajo el título *Determinismo e indeterminismo* en la que se reafirmaba en las posiciones mantenidas en 1929. PLANCK, M.: «Determinismo e indeterminismo», conferencia pronunciada el 4 de diciembre de 1937 en Munich, reproducida en: PLANCK, Max: *¿Determinismo o indeterminismo?.* SCHRÖDINGER, Erwin: *La idea fundamental de la mecánica ondulatoria*. HEISENBERG, Werner: *La unidad de la imagen científico natural del Mundo*, Madrid, ed. cuatro pliegos, 1947, pp. 24-32.

zones que llevaron a Einstein a contemplar críticamente los derroteros que tomaba la teoría cuántica hay que buscarlas en profundas razones epistemológicas, en su visión de la Naturaleza y el papel que juega la Física en la representación del mundo real. «El carácter aleatorio de los procesos espontáneos significaba que algo andaba mal con la causalidad clásica. Eso siempre había de perturbarlo profundamente.»¹⁴⁵ La primera referencia de Einstein a su incomodidad con las consecuencias conceptuales de la teoría cuántica aparece en una carta dirigida a su amigo Michele Besso el 9 de marzo de 1917, en ella mencionaba su artículo «*Quantentheorie der Strahlung*»¹⁴⁶.

Mucho más claro fue Einstein tres años después, cuando escribió a Max Born, «...Yo no creo que se halle la solución de los cuantos renunciando al continuo... Esto de la causalidad también me preocupa mucho. ¿Pueden entenderse la absorción y emisión cuánticas de luz en el sentido de la cabal necesidad causal, o quedaría un residuo estadístico? Debo confesar que aquí me falta el valor para defender mis convicciones. Pero renuncio muy a disgusto a la causalidad total.»¹⁴⁷ En esta carta Einstein expresaba en lo fundamental la postura que mantuvo hasta su muerte respecto de la mecánica cuántica. Más expresiva de su desazón fue la carta que escribió Einstein a Born el 29 de abril de 1924 «La opinión de Bohr sobre la radiación me interesa mucho. Pero no me obligarán a renunciar a la causalidad estricta sin defenderla más que hasta hora. La idea de que un electrón expuesto a la radiación elija por su propia voluntad el momento y la dirección en que dará el salto me resulta insoportable. En ese caso, preferiría ser zapatero o empleado de una timba y no físico. Verdad es que mis intentos de dar forma tangible a los cuantos hasta ahora me han fallado, pero no pierdo la esperanza. Y aunque no logre nada, siempre me quedará el consuelo de que no fue por culpa mía.»¹⁴⁸

La renuncia al principio de causalidad estricto se le antojaba a Einstein insoportable. Con el objeto de restituir la causalidad clásica en la Física, se embarcó en un programa de investigación destinado a elaborar una teoría del campo unificado. En 1922 Einstein completó su primer trabajo sobre la teoría del campo unificado, fue en un artículo escrito en colaboración con Grommer¹⁴⁹. En 1923

¹⁴⁵ PAIS, Abraham: «*El Señor es sutil...*», en *La ciencia y la vida de Albert Einstein*, Barcelona, Ariel, 1984, p. 413.

¹⁴⁶ *Albert Einstein correspondencia con Michele Besso. (1903-1955)*, op. cit., p. 147.

¹⁴⁷ Carta de A. Einstein a M. Born, fechada el 27 de enero de 1920, en *A. Einstein - M. y H. Born: Correspondencia (1916-1955)*, op. cit., pp. 35-37. En una carta posterior fechada el 3 de marzo de 1920, Einstein insistía a Born en las mismas ideas, op. cit., p. 40-41.

¹⁴⁸ Carta de Einstein a Born, fechada el 29 de abril de 1924, *A. Einstein - M. y H. Born: Correspondencia (1916-1955)*, op. cit., p. 108.

¹⁴⁹ EINSTEIN, A. y GROMMER, J.: «Beweis der Nichtexistenz eines überall regulären zentrisch symmetrischen Feldes nach der Feldtheorie von Kaluza», *Jerusalem University, scripta*, vol.I, número 7, 1923, 5 p. En este artículo Einstein y Grommer se referían a la teoría del campo unificado de Theodor Kaluza, inspirada en el trabajo de Hermann Weyl de 1918, en la que éste proponía una teoría del campo unificado basada en una generalización de la geometría riemanniana en un espacio de cuatro dimensiones. Kaluza sugería la formulación de una teoría del campo unificado mediante la ampliación del espacio-tiempo con la introducción de una nueva dimensión, dando lugar a un espacio-tiempo de cinco dimensiones. En su artículo Einstein y Grommer trataban de establecer soluciones sin singularidades a las ecuaciones de Kaluza sin lograrlo.

publicó cuatro breves artículos en los que se refirió a la propuesta de Eddington de una teoría del campo unificado basada en el trabajo de 1918 de Hermann Weyl sobre el tema¹⁵⁰. Einstein volvió a ocuparse de la teoría del campo unificado en 1925, en un breve artículo titulado: «*Einheitliche Feldtheorie von Gravitation und Elektrizität*»¹⁵¹, donde exponía su primera teoría del campo unificado, en la que depositó unas enormes expectativas que pronto fueron defraudadas, así lo reconoció en varias cartas enviadas a P. Ehrenfest: «Tengo una vez más una teoría de la gravitación-electricidad; muy hermosa pero dudosa»¹⁵². A pesar de este nuevo fracaso, Einstein no cambió su actitud sobre la teoría cuántica, el 4 de diciembre de 1926 escribió a Born: «La mecánica cuántica es algo muy serio. Pero una voz interior me dice que de todos modos no es ése el camino. La teoría dice mucho, pero en realidad no nos acerca gran cosa al antiguo secreto [debería decir: no nos acerca gran cosa al secreto del Viejo, en referencia a Dios, y no antiguo secreto]. En todo caso estoy convencido de que Él no juega a los dados.»¹⁵³

Fue en esas fechas cuando se celebró la V Conferencia Solvay en Bruselas, octubre de 1927, a la misma asistieron las principales figuras de la Física del momento relacionadas con la teoría cuántica: Planck, Einstein, Bohr, De Broglie, Heisenberg, Schrödinger, Born, Dirac, etc. La división de los físicos en torno a las dos interpretaciones de la nueva mecánica cuántica era evidente y la polémica suscitada cada vez más profunda. La atención de la V Conferencia Solvay pronto se centró en la famosa discusión entre Niels Bohr y Albert Einstein sobre el significado físico de la mecánica cuántica¹⁵⁴. A lo largo de su discusión con Bohr Einstein insistió, mediante la proposición de experimentos imaginarios cada vez más complicados, en demostrar que las relaciones de incertidumbre de Heisenberg podían ser burladas, especialmente en lo que se refiere a la transferencia de energía y momento, de tal manera que fuese posible realizar una descripción detallada y completa, en el espacio y en el tiempo, de la transferencia de energía y momento en procesos individuales¹⁵⁵. La conferencia concluyó con la

¹⁵⁰ EINSTEIN, Albert: «Zur allgemeinen Relativitätstheorie», *Preussische Akademie der Wissenschaften, Phys.-math. Klasse, Sitzungsberichte*, 1923, pp. 32-38 y 76-77; «Zur affinen Feldtheorie», *Preussische Akademie der Wissenschaften...*, 1923, pp. 137-140 y «Theory of the affine field», *Nature*, vol. 112, 1923, pp. 448-449. Sobre este tema ver PAIS, Abraham: «*El Señor es sutil*»... *La ciencia y la vida de Albert Einstein*, op. cit., pp. 329-355.

¹⁵¹ EINSTEIN, Albert: «*Einheitliche Feldtheorie von Gravitation und Elektrizität*», *Preussische Akademie der Wissenschaften, Phys.-math. Klasse, Sitzungsberichte*, 1925, pp. 414-419.

¹⁵² Cartas de Einstein a P. Ehrenfest, fechadas respectivamente los días 18 de agosto, 18 de septiembre y 20 de septiembre de 1925, citadas en PAIS, Abraham: «*El Señor es sutil*...», p. 348.

¹⁵³ Carta de Einstein a Born, fechada el 4 de diciembre de 1926, A. Einstein - M. y H. Born: *Correspondencia (1916-1955)*, op. cit., p. 119.

¹⁵⁴ HEISENBERG, Werner: *Diálogos sobre la física atómica*. Madrid, B.A.C., 1972, p. 101.

¹⁵⁵ BOHR, Niels: «Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics», contribución de Bohr a la obra colectiva: *Albert Einstein: Philosopher - Scientist*, SCHILPP, P.A. (ed.), op. cit., pp. 199-242. existe traducción al castellano de este trabajo de Bohr en BOHR, Niels: «Discusión con Einstein sobre problemas epistemológicos de la física atómica», *Física atómica y conocimiento humano*, Madrid, Aguilar, 1964, pp. 40-82.

conclusión de que no era posible rebasar los límites establecidos por la nueva mecánica cuántica en la descripción de los fenómenos atómicos, puesto que las relaciones de incertidumbre constituían un límite físico infranqueable en la descripción de los fenómenos cuánticos¹⁵⁶.

Einstein aprovechó la VI Conferencia Solvay, celebrada en 1930, para proseguir su discusión con Bohr sobre los problemas epistemológicos de la mecánica cuántica. En esta ocasión Einstein desarrolló una nueva argumentación basada en la teoría de la relatividad, relativa a la relación existente entre masa y energía establecida por la relatividad. Con ello pretendía superar el límite fijado por las relaciones de incertidumbre para el conocimiento del estado del sistema. Bohr después de meditar profundamente sobre el problema suscitado por Einstein llegó a la conclusión de que no era posible eliminar la incertidumbre establecida por las relaciones de Heisenberg en la determinación de la energía y del tiempo¹⁵⁷. Ello no significó una capitulación completa de Einstein, pues, aunque aceptó el formalismo matemático de la mecánica cuántica, continuó dudando del significado epistemológico defendido por Niels Bohr. Einstein centró su atención en demostrar la incompletud de la nueva teoría cuántica y no ya su inconsistencia matemática.

En 1931 Einstein volvió a ocuparse de los problemas epistemológicos planteados por la mecánica cuántica en un artículo escrito en colaboración con R. C. Tolman y B. Podolsky, titulado «*Knowledge of past and future in quantum mechanics*»¹⁵⁸, antecedente directo del famoso artículo de Einstein-Podolsky-Rosen (EPR) publicado en 1935 «¿*Puede considerarse completa la descripción de la realidad física por la mecánica cuántica?*»¹⁵⁹, cuestionaron seriamente la completud de la mecánica cuántica. La argumentación sostenía que sobre la base del *criterio de realidad física* expuesto la mecánica cuántica no satisfaría el *criterio de completud* expuesto en el mismo artículo, por lo que se hacía necesario aceptar la *incompletud* de la mecánica cuántica¹⁶⁰. Einstein mantuvo una opinión similar sobre la cuestión hasta su muerte en 1955, prueba de ello fue su reafirmación de las opiniones vertidas en el artículo de 1935 en el libro de homenaje dedicado a él en 1949¹⁶¹, o la carta que dirigió en 1950 a E. Schrödinger en la que

¹⁵⁶ BOHR, Niels: «Las reuniones de Solvay y el desarrollo de la física cuántica», en *Nuevos ensayos sobre física atómica y conocimiento humano*, Aguilar, Madrid, 1970.

¹⁵⁷ BOHR, Niels: «Discusión con Einstein...» en *Física atómica y conocimiento humano*, op. cit., pp. 67-68.

¹⁵⁸ EINSTEIN, Albert TOLMAN, Richard C. y PODOLSKY, Boris: «Knowledge of past and future in quantum mechanics», *Physical Review*, 37, 1931, pp. 780-781.

¹⁵⁹ EINSTEIN, Albert; PODOLSKY, Boris y ROSEN, Nathan.: «Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?», *Physical Review*, ser. 2, vol. 47, 1935, pp. 777-780.

¹⁶⁰ JAMMER, Max: *The Philosophy of Quantum Mechanics*, op. cit., p. 185.

¹⁶¹ SCHILPP, P. A. (ed.): *Albert Einstein: Philosopher-Scientist: A. Einstein: «Remarks to the Essays Appearing in this Collective Volume»*, op. cit., pp. 663-688, especialmente las páginas 681-683. «Tu crees en el Dios que juega a los dados y yo creo en la ley y la ordenación total de un mundo que es objetivamente...» A. Einstein-M. y H. Born: *Correspondencia (1916-1955)*, carta de Einstein dirigida a M. Born el 7 de septiembre de 1944, p. 189.

manifestaba sentirse seguro de que: «el carácter fundamentalmente estadístico de la teoría es simplemente una consecuencia de la incompletud de la descripción»¹⁶². El artículo de Einstein, Podolsky y Rosen representó la culminación del largo debate con Niels Bohr y, en general, con algunos de los más significados físicos creadores de la mecánica cuántica como Werner Heisenberg y Max Born.

La publicación de la *paradoja EPR*, como es conocida la conclusión del artículo de 1935, generó una polémica cuyos ecos todavía no se han apagado¹⁶³. Niels Bohr dedicó todos sus esfuerzos a desmontar la argumentación de Einstein, Podolsky y Rosen, unos meses más tarde publicó el artículo «*Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?*»¹⁶⁴. El trabajo de David Bohm de 1952 permitió someter a contrastación el experimento imaginario propuesto por EPR, posteriormente en colaboración con Aharonov en 1957 mejoraron la propuesta. Años después, en 1964, John S. Bell desarrolló el famoso *teorema de Bell* en su artículo «*On the Einstein-Podolsky-Rosen paradox*»¹⁶⁵ en el que afirmaba que la mecánica cuántica no podía completarse con ninguna teoría de variables ocultas, cuya propuesta experimental fue mejorada por John F. Clauser, Michel A. Horne, Abner Shimony y Richard Holt permitiendo su verificación y la sorprendente confirmación de la *no-localidad*¹⁶⁶, los experimentos de Alain Aspect fueron en ello determinantes¹⁶⁷: «Casi todos los experimentos en conexión con el teorema [de Bell] han proporcionado un fuerte apoyo a la teoría cuántica y a la realidad del entrelazamiento y de la no-localidad»¹⁶⁸. Probablemente a Einstein le desagradaría profundamente a donde ha conducido la conocida como *paradoja EPR*¹⁶⁹. «Al parecer, pues, Einstein esta-

¹⁶² SCHRÖDINGER, E.; PLANCK, M.; EINSTEIN, A. y LORENTZ, H. A.: *Letters on Wave Mechanics*, K. Przibram (ed.), New York, Philosophical Library, 1967, p. 40.

¹⁶³ RAE, Alastair: *Física cuántica. Ilusión o realidad?*, Madrid, Alianza, 1988. Aczel, Amir D.: *Entrelazamiento. El mayor misterio de la física*, Barcelona, Crítica, 2004.

¹⁶⁴ BOHR, Niels: «Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?», *Physical Review*, vol. 48, 1935, pp. 696-702. Bohr envió también una carta al editor de la revista *Nature* el 29 de junio de 1935. El artículo de EPR había aparecido en la *Physical Review* el 15 de mayo de 1935. BOHR, Niels: «Quantum mechanics and physical reality», *Nature*, 136, 1935, p. 65.

¹⁶⁵ BELL, John Stewart: «Sobre la paradoja de Einstein-Podolsky-Rosen», en Bell, J. S.: *Lo decible y lo indecible en mecánica cuántica*, Madrid, Alianza, 1990.

¹⁶⁶ CLAUSER, John F.; HORNE, Michel A.; SHIMONY, Abner y HOLT, Richard: «Proposed Experiment to Test Local Hidden-Variable Theories», en *Physical Review Letters*, nº 23, 1969, pp. 880-884.

¹⁶⁷ ASPECT, Alain: *Trois test experimentaux des inégalités de Bell par mesure de corrélation de polarization des photons*, tesis doctoral, Orsay, Universidad de Paris, 1983.

¹⁶⁸ Aczel, Amir D.: *Entrelazamiento. El mayor misterio de la física*, Barcelona, Crítica, 2004, p. 143. GREENBERGER, Daniel M.; HORNE, Michael A.; SHIMONY, Abner y ZEILINGER, Anton: «Bell's theorem without inequalities», en *American Journal of Physics*, 58 (12), diciembre de 1990, pp. 1.131-1.143.

¹⁶⁹ BOHM, David: *Causality and Chance in Modern Physics*, 1957, Routledge and Kegan Paul Ltd., Londres. Existe edición en castellano: BOHM, David: *Causalidad y azar en la física moderna*, México, Universidad Nacional Autónoma de México, 1959. DIRAC, Paul A. M.: *Principios de mecánica cuántica*, Barcelona, Ariel, 1968. BELL, John. Stewart: *Speakable and unspeakable in quantum mechanics*, Nueva York, Cambridge University Press, 1989, traducción al castellano BELL, John

ba doblemente equivocado cuando afirmó que “Dios no juega a los dados”. Los estudios sobre la emisión de partículas desde agujeros negros permiten sospechar que Dios no solamente juega a los dados, sino que, a veces, los echa donde nadie puede verlos.»¹⁷⁰

Stewart: *Lo decible y lo indecible en mecánica cuántica*. Madrid, Alianza, 1990. DELIGEORGES, Stéphane (dir.): *El mundo cuántico*. Madrid, Alianza, 1990. RAE, Alastair: *Física cuántica. Ilusión o realidad?*, Madrid, Alianza, 1988. GELL-MANN, Murray: *El quark y el jaguar*. Barcelona, Tusquets, 1995. WICK, D.: *The infamous boundary: seven decades of heresy in quantum physics*, Nueva York, Copernicus, 1996. PENROSE, Roger: *Lo grande, lo pequeño y la mente humana*, Madrid, Cambridge University Press, 1999. COHEN, R. S. HORNE, M. y STACHEL, J. (eds.): *Experimental metaphysics: quantum mechanical studies for Abner Shimony*, 2 vols. Boston, Kluwer Academic Publishing, 1999. GREENBERGER, D.; REITER, L. y ZEILINGER (eds.): *Epistemological and experimental perspective in quantum mechanics*, Boston, Kluwer Academic Publishing, 1999. ACZEL, A. D.: *Entrelazamiento. El mayor misterio de la física*, Barcelona, Crítica, 2004.

¹⁷⁰ HAWKING, Stephen W.: «La Mecánica cuántica de los agujeros negros», *Investigación y Ciencia*, nº 6, 1977, p. 29.