
LA REVOLUCION CONCEPTUAL EN LA FISICA DE COMIENZOS DE SIGLO

José Granés S.
Universidad Nacional de Colombia

En los primeros 25 años del presente siglo se produce en la física una revolución conceptual tan sólo comparable a la que tuvo lugar en el siglo XVII bajo el influjo de hombres de pensamiento como Galileo y Newton. Conceptos decantados por más de dos siglos de trabajo estable sobre la base de fundamentos firmes establecidos en la física del siglo XVII, concepciones arraigadas sobre el curso continuo y causal de la naturaleza que se expresan en imágenes mecanicistas del mundo físico serán radicalmente cuestionados y transformados en el curso de unos pocos años. La emergencia de las nuevas teorías -la relatividad y la mecánica cuántica replanteará, con particular intensidad, problemas filosóficos y epistemológicos sobre la naturaleza y los límites de la experiencia humana y sobre el significado y los modos válidos del conocimiento del mundo físico.

I. La Relatividad Especial y la transformación de los conceptos clásicos de tiempo, espacio y movimiento

En esta sección presentaremos en primer lugar los aspectos esenciales que llegan a configurar una situación de crisis en dos de las grandes teorías que se encontraban en la base de la física a finales del siglo XIX: la mecánica clásica y la teoría electromagnética de Maxwell. Mostraremos luego cómo esta crisis se resuelve, al menos parcialmente, con el advenimiento de la relatividad especial. Esta teoría introduce una transformación radical en los conceptos clásicos de espacio, tiempo y movimiento e implica además una reinterpretación drástica de la teoría electromagnética de Maxwell. En el desarrollo mismo del material trataremos de examinar algunas de las repercusiones que las transformaciones relativistas han podido tener en la visión del mundo físico y en la filosofía.

A) *La situación de crisis en las grandes teorías de la física a finales del siglo XIX*

El panorama de la física a finales del siglo XIX se encuentra dominado por dos grandes sistemas teóricos, la mecánica newtoniana y la teoría electromagnética de Maxwell¹. La mecánica newtoniana ha experimentado, en los siglos XVIII y XIX, a raíz de trabajos como los de Euler, d'Alembert, Lagrange y Hamilton, un proceso de reestructuración que ha afinado su coherencia conceptual y formal y que ha enriquecido la teoría con nuevos formalismos y nuevos métodos para abordar y resolver problemas. Sin embargo, las concepciones básicas sobre el espacio, el tiempo y el movimiento, y las leyes fundamentales que rigen el movimiento de los cuerpos siguen siendo esencialmente las mismas que, a finales del siglo XVII, había propuesto Newton en los *Principia*². La teoría electromagnética de Maxwell,

1 Es cierto que en el siglo XIX se desarrollan otras dos importantes teorías en el campo de la física: la termodinámica y la mecánica estadística. La primera, sin embargo, es una teoría fenomenológica que se propone, en primer lugar, caracterizar globalmente los procesos que envuelven intercambios de calor y de trabajo en sistemas macroscópicos y, en segundo lugar, establecer, entre los múltiples procesos que cumplen la condición de la conservación de la energía, aquellos que realmente pueden ocurrir en la naturaleza. La mecánica estadística clásica es un fundamento microscópico de la termodinámica que establece, entre otras cosas, el carácter probabilístico de las leyes de esa disciplina. Sin embargo las leyes, incluso a nivel microscópico, que rigen los movimientos y las interacciones de las partículas, siguen siendo, en esta mecánica estadística, las leyes de la mecánica clásica. Por lo tanto puede sostenerse que en cierto sentido la mecánica está en la base de la mecánica estadística y también, por ello, de la termodinámica.

2 Einstein ha señalado este hecho en sus "Notas autobiográficas" de la siguiente manera: "Volvamos ahora al campo de la física tal como se presentaba en ese tiempo [finales del siglo XIX]. A pesar de los desarrollos fructíferos sobre elementos particulares, una rigidez dogmática prevalecía en cuanto a los principios: En un comienzo (si es que alguna vez hubo tal comienzo) Dios creó las leyes de Newton del movimiento junto con las masas y las fuerzas necesarias. Eso fue todo; más allá de esto lo demás se sigue, por medio de deducciones, del desarrollo de métodos matemáticos apropiados. Lo que el siglo XIX logró sobre esta sólida base, especialmente por medio de la aplicación de las ecuaciones diferenciales parciales, estaba destinado a despertar la admiración de cualquier persona receptiva". Albert Einstein, "Autobiographical Notes" en Paul Arthur Schilpp, *Albert Einstein*:

por su parte, ha logrado una explicación unificada de los fenómenos eléctricos, magnéticos y ópticos y una formulación matemática muy sintética que ha posibilitado, entre otras cosas, la predicción de ondas electromagnéticas de naturaleza similar a la de la luz. Sin embargo, la interpretación de la teoría electromagnética, vigente en la segunda mitad del siglo XIX y defendida por el mismo Maxwell, es una interpretación mecanicista. Como lo ha señalado Einstein: “No debe sorprendernos [...] que, por así decirlo, todos los físicos del siglo pasado viesan en la mecánica clásica una fundamentación firme y definitiva para toda la física —en realidad para toda la ciencia natural— y que nunca se cansasen en sus intentos de basar la teoría del electro-magnetismo de Maxwell, que entretanto comenzaba lentamente a ganar aceptación, también sobre la mecánica. Incluso Maxwell y H. Hertz, quienes retrospectivamente aparecen como los demolidores de la fe en la mecánica como base de todo pensamiento físico, en su pensamiento consciente adhirieron enteramente a la mecánica como fundamento seguro de la física”³.

1. La mecánica

En la base de la mecánica están los conceptos de tiempo, espacio y movimiento absolutos, introducidos por Newton a finales del siglo XVII en los *Principia*. Así rezan las formulaciones del célebre *Escolio* sobre el tiempo y el espacio: “El tiempo absoluto, verdadero y matemático, en sí y por su propia naturaleza sin relación a nada externo fluye uniformemente y se dice con otro nombre duración” y “El espacio absoluto, tomado en su naturaleza, sin relación a nada externo, permanece siempre similar e inmóvil”⁴. Como se puede tal vez entrever en estas formulaciones sintéticas, para Newton tiempo y espacio absolutos no son solamente conceptos

Philosopher-Scientist, Vol I, Harper & Row Publishers, pág. 19 (la traducción del inglés es nuestra).

- 3 *Ibid.*, pág.21 (la traducción del inglés es nuestra). La “íntima asociación entre electromagnetismo y mecánica” ha sido puesta de relieve también por Thomas S. Kuhn en su libro *La teoría del cuerpo negro y la discontinuidad cuántica, 1894-1912*, Alianza Universidad, Madrid, 1980, pág.52.
- 4 Isaac Newton, *Principios matemáticos de la filosofía natural*, Editora Nacional, Madrid, 1982, “Escolio” págs.228-229.

básicos de la mecánica teórica sino ante todo realidades objetivas del mundo físico. Son entidades reales que, si bien no caen de manera directa bajo la percepción de los sentidos, constituyen, sin embargo, un fundamento de toda realidad material mutable y perceptible. Debe existir de antemano el espacio absoluto, según Newton inmutable e inmóvil, para que en él puedan luego ubicarse los cuerpos materiales. Debe existir de antemano el tiempo absoluto, independiente de todo, fluyendo siempre de igual forma, para que los cuerpos materiales puedan cambiar y moverse. Las propiedades de ese tiempo y de ese espacio —por eso justamente se llaman absolutos— no se encuentran condicionadas por nada; emanan, si se quiere, directamente del poder divino. Sobre la base del tiempo y el espacio absolutos es posible introducir también el concepto de movimiento absoluto como “la traslación de un cuerpo desde un lugar absoluto a otro”. Al lado de los conceptos absolutos y en contraste con ellos, Newton introduce los correspondientes conceptos *relativos*. Los tiempos relativos que se miden usando ciertos movimientos (el de los astros visto desde la Tierra, por ejemplo), los lugares relativos que se determinan con respecto a grupos de objetos y los movimientos relativos como desplazamientos entre lugares relativos. Los conceptos relativos, aunque pueden en muchos casos resultar útiles para los efectos de la medición, no son sin embargo los conceptos “verdaderos”, son apenas, como dice Newton, conceptos “vulgares” y “comunes”. Una física con pretensiones de verdad no podría basarse en ellos. Por eso las leyes que rigen el movimiento de los cuerpos —las conocidas tres leyes de Newton— deben entenderse como los axiomas básicos que regulan los movimientos *absolutos* y que sólo de manera circunstancial o aproximada pueden aplicarse a ciertos movimientos relativos⁵. Las leyes del movimiento no podrían tener un significado teórico preciso sin estos conceptos absolutos. Aunque pueda parecer paradójico, en razón de la casi total indeterminación empírica de estos conceptos, sin ellos la física quedaría huérfana de criterios claros para juzgar sobre la aplicabilidad de las leyes de movimiento en diferentes circunstancias.

5 En realidad las leyes de Newton pueden también aplicarse a los movimientos relativos tal como éstos se observan desde los así llamados “sistemas inerciales”. Para Newton un sistema inercial es un cuerpo o un sistema de cuerpos en movimiento rectilíneo uniforme con respecto al espacio absoluto. En los siglos XVIII y XIX se intentó mantener la idea de sistema inercial prescindiendo de la noción problemática de espacio absoluto. El sistema inercial fue definido (en una forma tautológica) como aquel en el cual las leyes de Newton dan cuenta correctamente de los movimientos.

No es de extrañar, sin embargo, que los conceptos absolutos, problemáticos sobre todo en razón de sus connotaciones metafísicas y teológicas (recuérdense por ejemplo las alusiones de Newton al espacio absoluto como "sensorio de Dios"⁶), fuesen controvertidos desde el momento mismo en que fueron propuestos. Grandes pensadores, contemporáneos de Newton, como Berkeley, Leibniz y Huygens, polemizaron agudamente contra ellos⁷. ¿Por qué, sin embargo, esta crítica aguda no tuvo, durante los dos siglos que siguieron a la publicación de los *Principia*, los efectos contundentes sobre la mecánica que hoy en día, después de la teoría de la relatividad, podemos vislumbrar como posibles? Seguramente porque Newton logró hacer de los conceptos absolutos un fundamento necesario, coherentemente articulado a las leyes básicas de una mecánica matemática y rigurosa que resultó además muy fértil en el planteamiento de problemas solubles y en la predicción exacta de nuevos fenómenos⁸. Berkeley, Leibniz y Huygens, a pesar de la crítica certera, no lograron hacer otro tanto.

-
- 6 Estas alusiones pueden encontrarse, por ejemplo, en la *Optica*, Cuestión 28, y en el "Escolio General" al final de los *Principia*.
- 7 Una discusión sobre las posiciones de Leibniz y Huygens puede encontrarse en Max Jammer, *Concepts of Space*, Harvard University Press, cap. 4. La contradicción entre Leibniz y Newton a propósito de estos conceptos también se revela en *La polémica Leibniz-Clarke*, edición de Eloy Rada, Madrid, Taurus, 1980. Sobre la concepción leibniziana del espacio puede consultarse el libro de Dino Garber *El espacio como relación en Leibniz*, Caracas, Equinoccio, Editorial de la Universidad Simón Bolívar, 1980. La crítica de George Berkeley aparece en los *Principios del conocimiento humano* (numerales CX-CXVII), Madrid, Sarpe, 1985. Las posiciones de Berkeley, Leibniz y Huygens coinciden en considerar que el espacio y el tiempo son conceptos, ideas, abstracciones, carentes de una realidad independiente de la mente humana, que el hombre elabora para dar cuenta de las relaciones mutuas entre los objetos materiales y de los cambios en esas relaciones.
- 8 Es probablemente también por esta razón que, a pesar de la manifiesta incomodidad de algunos físicos con respecto a los conceptos absolutos, éstos, ya fuese de manera implícita o explícita, siguieron vigentes en las elaboraciones de la mecánica que se llevaron a cabo durante el siglo XVIII. La posición que Leonhard Euler expresa con relación a los conceptos absolutos en varios de sus escritos es seguramente típica y similar a la que adoptaron tácitamente muchos físicos de la época. En sus "Cartas a una princesa alemana", Euler comienza señalando cómo "los principios de la mecánica han sido establecidos ya tan sólidamente, que sería una gran equivocación pretender aún dudar de

La imagen mecanicista del mundo físico que se conforma sobre la base de la mecánica clásica reduce la naturaleza a un modelo de partículas con masa interactuando entre sí por fuerzas que se transmiten a distancia. Las partículas se mueven en el espacio absoluto y sus movimientos se rigen por las tres leyes de Newton. Reina el determinismo absoluto, de tal manera que, sobre la base del conocimiento del estado de movimiento de un sistema de partículas en un determinado momento, las leyes de la mecánica permiten calcular con absoluta precisión el estado del sistema en un instante posterior. La imagen mecanicista admite también, además de las partículas, medios continuos que pueden propagar ondas mecánicas. Una onda es la perturbación extensa (deformación física del medio, compresión o dilatación de ciertas partes del medio etc.) de un medio elástico, perturbación que se propaga en ese medio. La descripción matemática del estado de un sistema de partículas y la del estado de un medio que propaga ondas son distintas. El estado del sistema de partículas se describe especificando (como funciones del tiempo) las posiciones y velocidades de las partículas. La descripción del estado del medio requiere de funciones continuas de las coordenadas y del tiempo que indiquen en cada punto y en cada instante la perturbación del medio.

2. La óptica y la electrodinámica

A comienzos del siglo XIX, en razón de trabajos sobre la óptica de los fenómenos de interferencia y difracción llevados a cabo por hombres de ciencia como Young y Fresnel, el espacio absoluto de Newton cobró, por así decirlo, materialidad al poder relacionarse con una noción que en la física de ese siglo cobró una extraordinaria importancia: el éter. Los trabajos experimentales de Young y Fresnel fueron decisivos para zanjar de manera

su verdad". Partiendo de esta premisa la argumentación de Euler intenta mostrar como el espacio y el tiempo absolutos, aunque inaccesibles a la experiencia empírica directa, son bases necesarias para la mecánica y deben ser tomados, dada precisamente la probada y ya indiscutible verdad de esta ciencia, como entidades reales. "Los metafísicos [pensadores como Berkeley y Leibniz]," concluye Euler "cometen un gran error cuando pretenden eliminar por completo del mundo el espacio y el lugar, al sostener que no son sino ideas abstractas e imaginarias". Véase Leonhard Euler, *Reflexiones sobre el espacio, la fuerza y la materia*, Madrid, Alianza Editorial, 1985. Puede consultarse también la obra de Ernst Cassirer *El problema del conocimiento*, México, Fondo de Cultura Económica, 1956, Tomo II, Libro VI, Cap. II.

concluyente una polémica sobre la naturaleza de la luz que, desde los tiempos de Newton, enfrentaba a los defensores de una concepción que describe la luz como un flujo de partículas (Newton) con aquellos que pensaban la luz como un pulso o una onda (Huygens, entre otros). Los trabajos mencionados sobre los fenómenos de interferencia y difracción mostraron que la luz debe ser pensada como una onda. Esta conclusión abrió sin embargo serios interrogantes. Siendo toda onda, dentro de los marcos de la concepción mecanicista prevaleciente en la época, la perturbación de un medio, que se propaga a través de él en virtud de sus propiedades elásticas, ¿cuál era entonces el medio que propagaba la luz? Para poder responder esta pregunta crucial, se hizo necesario poner nuevamente en juego la vieja noción del éter, ahora como medio sutil que permea todo el espacio, que penetra incluso en los medios transparentes posibilitando también en ellos la propagación de la luz. Esta idea podía relacionarse fácilmente con el espacio absoluto de Newton: de alguna manera el éter podía considerarse como una réplica material de ese espacio que adquiriría así, de paso, una existencia menos abstracta, menos metafísica. En buena medida es posible interpretar gran parte del desarrollo de la física del siglo XIX en términos de las elaboraciones, de las transformaciones sucesivas y de los fracasos de las teorías del éter⁹. La permanencia dentro de la física, hasta el surgimiento en 1905 de la Relatividad Especial, de esta entidad que, al igual que el espacio absoluto de Newton desafiaba uno por uno todos los intentos experimentales

9 La historia fascinante de los avatares de la noción del éter en la física del siglo XIX se expone en el primer tomo de la obra clásica de Sir Edmund Whittaker, *A History of the Theories of Aether and Electricity*, New York, Humanities Press, 1973. El éter tuvo que sufrir modificaciones tanto por la presión del desarrollo cada vez más elaborado de las teorías sobre la propagación de las ondas elásticas en medios continuos como por los resultados negativos de los numerosos experimentos diseñados para tratar de poner en evidencia el movimiento de la Tierra con respecto al éter. La idea central en estos experimentos era siempre la misma: la luz viaja con respecto al éter con una velocidad c que le es propia; la Tierra se desplaza con respecto al éter y por lo tanto en la Tierra la velocidad de un rayo de luz debe ser distinta de c y debe poderse calcular usando las transformaciones de Galileo para las velocidades; las diferencias de velocidad se pueden medir usando métodos de interferometría. Entre estos experimentos el más conocido es indudablemente el de Michelson y Morley que ha alcanzado el estatuto de experimento clásico en la historia de la física y que ha sido repetido, de manera cada vez más afinada, numerosas veces. Como se sabe, este experimento arrojó un resultado negativo, es decir, no logró, a pesar de su exactitud de segundo orden en v/c

para ponerla en evidencia, es un ejemplo del carácter persistentemente conservador de los paradigmas científicos. El abandono de la noción de éter hubiera implicado un cambio cualitativo radical en la manera de pensar toda una región de fenómenos; esta es una vía que sólo se aborda cuando los reiterados esfuerzos por adaptar el paradigma vigente han fracasado y surgen nuevas alternativas prometedoras de explicación. El éter garantizaba la interpretación mecanicista de los fenómenos ópticos y también, después de los trabajos de Maxwell, la de los fenómenos eléctricos y magnéticos. La persistencia del éter es en realidad la persistencia de la visión mecanicista de la naturaleza.

Maxwell, de hecho, intentará también en su teoría interpretar mecánicamente los fenómenos eléctricos y magnéticos. Siguiendo a Faraday, elaborará una teoría de campos¹⁰ que elimina las acciones a distancia entre cuerpos cargados e interpreta las fuerzas como acciones locales del éter, modificado por la presencia de las cargas, sobre los cuerpos¹¹. En cierto sentido los campos eléctricos y magnéticos vienen a constituir, en la interpretación maxwelliana, una descripción indirecta del estado mecánico del éter en cada punto. De hecho, los campos deben permitir el cálculo de la energía "elástica" y de los "esfuerzos" del éter en cada región. Las ecuaciones del campo (ecuaciones de Maxwell) permiten deducir matemáticamente una ecuación de onda y a partir de allí interpretar la luz

(v velocidad de la Tierra, c velocidad de la luz), detectar ningún movimiento de la Tierra con respecto al éter. El artículo original de Michelson y Morley aparece en L. Pearce Williams (editor), Madrid, *La teoría de la relatividad*, Madrid, Alianza Universidad, 1975.

- 10 En la teoría electromagnética los campos son entidades matemáticas continuas que se pueden relacionar en cada punto con las fuerzas que experimentaría una partícula colocada en ese punto. La teoría de Maxwell permite en principio calcular los campos en una región del espacio cuando se conoce la distribución de cargas y corrientes.
- 11 A este respecto Maxwell dice lo siguiente en el prefacio a la primera edición de su tratado de electricidad y magnetismo: "[...] Faraday, en los ojos de su mente, vio líneas de fuerza atravesando el espacio donde los matemáticos veían centros de fuerza atrayéndose a distancia: Faraday vio un medio donde ellos no veían sino distancia: Faraday buscó la base de los fenómenos en acciones reales ocurriendo en el medio, ellos se sentían satisfechos de haberla encontrado en un poder de acción a distancia impresa sobre los fluidos eléctricos". J. C. Maxwell, *A Treatise on Electricity & Magnetism*, New York, Dover Publications Inc., Vol I, p. ix. (la traducción del inglés es nuestra).

como un fenómeno electromagnético. La propagación de la luz será, también en esta teoría, pensada estrictamente según los cánones del mecanicismo. La luz es para Maxwell una onda mecánica en el éter que puede describirse matemáticamente a través de la dinámica de los campos eléctricos y magnéticos¹².

3. La situación de crisis

El paradigma dominante, alrededor del cual se intenta organizar una visión unificada del mundo físico, es entonces a finales del siglo pasado el paradigma mecanicista. ¿Cuáles son las dificultades con las que tropieza este paradigma? ¿Por qué cabe decir que hacia finales de siglo la física ha entrado, a pesar de los grandes avances en la elaboración matemática de las teorías, en una situación de crisis? Dos tipos de dificultades irán erosionando gradualmente la confianza de los físicos en el paradigma existente. Uno de ellos hace referencia al problema de los fundamentos, de las bases conceptuales de la mecánica. Dada la interpretación mecanicista de la electrodinámica, la problematización de los fundamentos de la mecánica implicaba también poner en cuestión las bases de la teoría de Maxwell. El otro tipo de dificultad se refiere a los permanentes ajustes teóricos, realizados muchas veces *ad hoc* y no siempre justificados de manera suficientemente clara, que era preciso realizar en los modelos del éter y en las ideas sobre la propagación de la luz para mantener, así fuese precariamente, la concordancia entre hechos experimentales y teoría.

Las contradicciones con la experiencia provienen principalmente, como ya se ha señalado, de los continuos fracasos de los distintos experimentos diseñados para determinar el movimiento de la Tierra con respecto al éter. El desajuste entre los resultados de determinados experimentos y la teoría del éter propicia continuas enmiendas *ad hoc* en esta teoría, que van

12 "En varias partes de este tratado," dice Maxwell, "se ha hecho un intento por explicar los fenómenos electromagnéticos por medio de acciones mecánicas transmitidas de un cuerpo a otro a través de un medio que ocupa el espacio entre ellos. La teoría ondulatoria de la luz también supone la existencia de un medio. Tenemos que mostrar ahora que las propiedades del medio electromagnético son idénticas a las del medio luminífero". *Ibid.*, Vol II, cap. XX, pág.431 (la traducción del inglés es nuestra).

desdibujando su simplicidad y nitidez iniciales¹³. Los físicos pierden poco a poco su confianza inicial en la idea del éter y en la interpretación mecánica de los fenómenos electromagnéticos. Mientras la confianza en la interpretación mecanicista entraba en crisis, el trabajo matemático con las ecuaciones resultaba, por el contrario, sumamente fructífero. Como lo ha señalado Einstein, “uno se acostumbró a operar con estos campos como sustancias independientes sin encontrar necesario dar una explicación de su naturaleza mecánica; así la mecánica como base de la física se fue abandonando casi imperceptiblemente en razón de que su posibilidad de adaptarse a los hechos se presentó finalmente como una empresa sin

-
- 13 Inicialmente se piensa el éter como un medio sutil (posiblemente una especie de gas tenue) que permanece en reposo con relación al espacio absoluto de Newton. Los resultados de experimentos con haces de luz propagándose en medios refractantes en movimiento llevan a Fresnel a proponer una primera modificación importante: el éter no permanece, todo él, completamente en reposo. El éter contenido en medios refractantes en movimiento es arrastrado *parcialmente* por el medio. Para lograr una concordancia con los datos experimentales es necesario suponer que la velocidad de arrastre depende del índice de refracción del medio. Esta suposición a su vez traerá contradicciones teóricas al tomar en cuenta que la velocidad de la luz depende del índice de refracción. Entre tanto, la elaboración de teorías sobre la propagación de ondas mecánicas en distintos medios y en particular los avances de Poisson sobre propagación de ondas longitudinales y transversales en medios sólidos, conducen a la conclusión de que la idea del éter como un medio fluido es inaceptable. El éter debe ser pensado como un sólido elástico. Pero, ¿cómo puede la Tierra moverse prácticamente sin fricción a través de un sólido elástico? A partir de ésta y otras preguntas comenzará a trabajarse con ahínco en diversos modelos mecánicos del éter. La elaboración de este tipo de modelos deviene todo un campo de investigación en la física del siglo XIX. Para un análisis de la historia detallada de estos esfuerzos, puede consultarse el libro de Whittaker anteriormente citado. El último gran intento clásico de interpretar coherentemente la teoría de Maxwell sobre la base del éter fue la llamada teoría del electrón de H. A. Lorentz, casi contemporánea de la relatividad especial. Lorentz, trabajando dentro de cánones estrictamente clásicos y sobre la base de la idea original de un éter completamente inmóvil en el espacio absoluto de Newton, logra dar cuenta, de manera bastante coherente, de muchos de los resultados experimentales (incluyendo los del experimento de Michelson y Morley) y de muchos de los anteriores ajustes teóricos *ad-hoc*. La teoría de Lorentz no logra sin embargo competir con la relatividad especial que explica esencialmente los mismos hechos pero sobre la base de una estructura conceptual y teórica más nítida

esperanzas”¹⁴. El precio que se pagaba al abandonar la interpretación mecanicista de la electrodinámica era la instauración de una división radical en cuanto a los principios fundamentales para la interpretación del mundo físico. Por una parte, los principios de la mecánica permitían el cálculo de movimientos de cuerpos sometidos a fuerzas pero no daban ya ninguna indicación sobre la naturaleza de una de las clases más importantes de fuerzas: las fuerzas electromagnéticas. Por otra parte, estas últimas podían calcularse con base en los principios de la electrodinámica, pero éstos ya no se presentaban como reductibles a los de la mecánica.

Los problemas que se originaban en las dificultades para lograr una concordancia suficientemente clara entre las teorías y los resultados de experimentos a que hemos hecho referencia, no fueron los únicos que tuvo que afrontar la física a finales del siglo pasado. Las críticas renovadas a los fundamentos conceptuales de la mecánica por parte de Ernst Mach contribuyeron indudablemente a socavar la confianza exagerada de muchos físicos que veían en ella una ciencia definitivamente establecida. Estas críticas tuvieron una influencia notable sobre Einstein y en cierto sentido abrieron el camino hacia la relatividad¹⁵.

alejada sin embargo de los conceptos clásicos. Para una sucinta explicación de los elementos básicos en la teoría de Lorentz pueden consultarse los siguientes libros: José Manuel Sánchez Ron, *El origen y desarrollo de la relatividad*, Madrid, Alianza Universidad, 1983, y William Berkson, *Las teorías de los campos de fuerza desde Faraday hasta Einstein*, Madrid, Alianza Universidad, 1981.

- 14 A. Einstein, “Autobiographical Notes”, *op. cit.* págs. 25-27. El proceso que describe Einstein en esta cita, por el cual se divorcia la operatividad matemática con las entidades de su interpretación física, se ha dado con frecuencia en la historia de la ciencia. Como ejemplos descolantes podrían citarse: 1. El sistema astronómico de Ptolomeo. En la época de Copérnico todos los astrónomos trabajan con los deferentes, epiciclos, ecuantes etc... de la astronomía ptolemaica, tomándolos sin embargo como simples recursos matemáticos para “salvar los fenómenos” pero sin atribuirles realidad física. 2. La teoría de la gravitación de Newton, que también resultó fructífera en cuanto a los desarrollos matemáticos pero que no contó con una interpretación física adecuada de la naturaleza de la atracción.
- 15 Einstein, en sus “Notas autobiográficas”, trae la siguiente apreciación sobre el trabajo de Mach: “Fue Ernst Mach quien, en su *Historia de la mecánica*, golpeó esa fe dogmática [en la mecánica]; a este respecto ese libro ejerció una profunda influencia sobre mí, en mi época de

En su libro *La ciencia de la mecánica*, Mach se propone realizar un escrutinio crítico de los fundamentos de esta ciencia, intentando mostrar, entre otras cosas, cómo los principios que pueden ser aceptados son tan sólo formulaciones sintéticas —que posibilitan por eso mismo una economía de pensamiento— de numerosos hechos de experiencia. La experiencia es en efecto para Mach la principal fuente del conocimiento científico y cualquier principio que parezca alejado de ella debe ser sometido a un escrutinio crítico. Esto es justamente lo que hay que hacer con los conceptos de tiempo, espacio y movimiento absoluto de la mecánica newtoniana que aparentemente carecen de todo referente empírico. “Parecería como si Newton (...) [en su concepción sobre el tiempo y el espacio absoluto] permaneciese aun bajo la influencia de la filosofía medieval, como si hubiese resuelto ser infiel a su resolución de investigar sólo hechos reales”¹⁶. Para Mach los conceptos absolutos de Newton son “concepciones metafísicas ociosas” desprovistas de cualquier valor práctico o científico. En efecto, “*medir* los cambios de las cosas por medio del *tiempo* es algo que está completamente por fuera de nuestras capacidades. Por el contrario, el tiempo es una abstracción, a la cual llegamos a través de los cambios de las cosas; la hacemos porque no estamos restringidos a una medida *definida*, estando como están todas ellas interconectadas”¹⁷. Debemos partir, no de entidades imaginarias, introducidas *a priori*, como el tiempo y el espacio absoluto, sino de aquello que es directamente accesible a nuestra experiencia, o sea de la existencia de cuerpos en relaciones cambiantes unos con respecto a otros. Al observar estos cuerpos todo lo que podemos hacer es determinar, ya sea las relaciones de geometría y de distancia que guardan entre ellos, ya sea las relaciones entre los cambios de sus posiciones. Podemos así, nos explica Mach, determinar por ejemplo si un movimiento es uniforme *con respecto a otro movimiento*, pero la pregunta de si un movimiento es *en sí mismo uniforme*

estudiante. Veo la grandeza de Mach en su incorruptible escepticismo e independencia; en mis años jóvenes, sin embargo, la posición epistemológica de Mach también me influyó notablemente, una posición que hoy en día me parece esencialmente insostenible. Mach no ilumina de manera correcta la naturaleza esencialmente constructiva y especulativa del pensamiento y más especialmente del pensamiento científico...” *op.cit.* ,pág.21.

16 Ernst Mach, *The Science of Mechanics: A Critical and Historical Account of its Development*, Illinois, The Open Court Publishing Company, 1974, Cap. II, No VI, pág.272.

17 *Ibid.*, pág, 273.

carece por completo de sentido. Las comparaciones de distintos movimientos entre sí —que se reducen en última instancia a comparaciones “de aquello que está contenido en el dominio de nuestra memoria con aquello que está contenido en el dominio de nuestras percepciones sensoriales”— pueden llevarnos al concepto abstracto de tiempo. No hay que olvidar sin embargo que éste no es sino eso, un concepto, una idea, carente por lo tanto de una realidad propia por fuera del entendimiento humano. Las propiedades que podamos atribuirle al tiempo deben provenir de las relaciones observables entre los movimientos y no pueden ser postuladas de antemano. De manera similar, las ideas de espacio y movimiento provienen de las relaciones geométricas entre los cuerpos y de sus cambios. Podemos comparar la posición cambiante de un cuerpo K con la de muchos otros, y al tener esta libertad de escogencia podemos caer en la tentación de creer que los cuerpos A, B, C,...., usados en la comparación son superfluos y llegar a pensar que podemos medir la posición y el movimiento de manera absoluta, sin relación a objeto alguno. Cometeríamos así un doble error. Mach ha retomado, con mayor coherencia, los planteamientos de Leibniz sobre el espacio y el tiempo. Estos no son sino ideas, relaciones abstraídas de la comparación de posiciones y movimientos de cuerpos observables. No cabe por lo tanto poner *a priori* su esencia y sus características. La definición misma, las propiedades y la medición cuantitativa del espacio y del tiempo dependen estrechamente de la naturaleza de los cuerpos materiales, de sus relaciones y de sus cambios.

B) El espacio, el tiempo y el movimiento en la relatividad especial

En 1905 Einstein publica su clásico artículo “Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento”¹⁸, en el cual expone los principios y los desarrollos más importantes de la que hoy en día se denomina teoría de la relatividad especial o restringida. Esta teoría transforma radicalmente las ideas clásicas sobre el espacio, el tiempo y el movimiento. Los nuevos

18 El título del artículo hace referencia a un problema importante en la física de la época. Las ecuaciones de Maxwell son válidas para cuerpos que se encuentran en reposo con respecto al éter. La pregunta era entonces ¿cuáles son las leyes que describen los fenómenos electromagnéticos en cuerpos que se encuentran en movimiento con respecto al éter? Einstein en su artículo resuelve este problema postulando un principio de relatividad válido tanto para la mecánica como para la electrodinámica.

conceptos conducen a la elaboración de una nueva mecánica, distinta de la mecánica newtoniana, que reinterpreta y relaciona entre sí en una forma diferente los conceptos de masa, momentum y energía. La relatividad especial deja inmodificada la expresión matemática de las ecuaciones de Maxwell pero promueve sin embargo una interpretación distinta, más abstracta, de la electrodinámica, prescindiendo del éter y de cualquier imagen o analogía mecanicista.

La teoría de la relatividad especial sorprende por la nitidez y coherencia de su estructura y por la simplicidad y radicalidad de sus principios. Parte de dos postulados: el así llamado Principio de Relatividad, según el cual “las mismas leyes de la electrodinámica y de la óptica serán válidas para todos los sistemas de referencia para los cuales las ecuaciones de la mecánica son correctas”, y el postulado de la constancia de la velocidad de la luz en el vacío. En palabras de Einstein, este segundo postulado establece que “la luz se propaga siempre en el espacio vacío con una velocidad definida c , independiente del estado de movimiento del cuerpo emisor”¹⁹.

1. El tiempo y la simultaneidad

Además de los dos postulados anteriormente enunciados, la teoría introduce

19 A. Einstein “On the electrodynamics of moving bodies” en *The Principle of Relativity*, Dover, pág.37. Es posible discutir e incluso cuestionar estos postulados. El primero de ellos mantiene la idea del sistema inercial de la mecánica postnewtoniana, entendido como el sistema en el cual valen (en primera aproximación) las leyes de la mecánica. Establece entonces, en contradicción con lo que se pensaba a finales del siglo XIX, que en estos sistemas inerciales serán también válidas las leyes de la electrodinámica. Es decir, todas las leyes fundamentales de la física conocidas en aquel momento deben ser las mismas en todos los sistemas inerciales de referencia. El principio de relatividad impone una fuerte restricción a la forma que pueden adoptar las leyes válidas de la física: sólo son admisibles leyes que permanezcan invariantes en su forma matemática al pasar de un sistema inercial a otro. Einstein es consciente de la doble limitación de este postulado (limitación que será superada en la relatividad general): mantiene por una parte la noción problemática de sistema inercial y por otra limita la validez de las leyes solamente a esa clase de sistemas. El segundo postulado introduce, por así decirlo, un nuevo absoluto en la física, la velocidad de la luz en el vacío que, como antes el tiempo y el espacio absolutos de Newton, no depende, en la relatividad especial, de nada. Este aspecto “metafísico” de la relatividad especial será también superado en la relatividad general.

algunas definiciones. La primera y la más importante de ellas es la definición de simultaneidad o, si se quiere, de tiempo. De hecho, como lo señala Einstein, “todos nuestros juicios en los cuales juega un papel el tiempo son siempre juicios sobre *eventos simultáneos*”²⁰. Einstein comienza definiendo lo que vamos a entender por el tiempo de un evento en un lugar determinado de nuestro sistema inercial. El tiempo del evento es simplemente *la indicación de un reloj*, colocado en el sitio del evento, en el momento en que éste ocurre. Después de leer la caracterización del tiempo absoluto que trae Newton, la definición de Einstein puede parecer excesivamente simple. Incluso, desde la perspectiva newtoniana, “definir” el tiempo resulta extraño. El tiempo absoluto, en efecto, es algo que posee realidad objetiva, algo existente, que no se trata de “definir” sino de caracterizar. La definición que da Einstein no es sin embargo trivial. De hecho, en ella Einstein está recogiendo de manera fructífera una observación de Mach: el tiempo, como concepto, proviene en última instancia de la comparación de movimientos de cuerpos materiales o bien, con mayor generalidad, de la comparación de fenómenos cambiantes. El tiempo, así entendido, se relaciona de manera íntima con la naturaleza de los fenómenos y debe ser introducido, como concepto de la física, a partir de ellos. Como lo ha expresado muy bien Minkowski, “el tiempo, como concepto inequívocamente determinado por los fenómenos, ha de ser destituido de su elevada posición”²¹, de esa “elevada posición” que le había asignado la mecánica de Newton. Ahora bien, un reloj no es sino un fenómeno físico que se repite periódicamente (por ejemplo, movimiento de engranajes mecánicos controlados por un péndulo, oscilaciones de un cristal de cuarzo, reflexiones de luz en una cavidad etc...). Definimos así el tiempo, ligado al fenómeno, como la periodicidad de este último. En este primer paso no hemos hecho sino introducir lo que podríamos llamar un tiempo local, es decir, un tiempo para cada punto de un sistema inercial. ¿Cómo poner de acuerdo todos los relojes de un mismo sistema? Necesitamos un

20 *Ibid.*, pág. 39. Simultaneidad y tiempo son evidentemente conceptos diferentes. Lo que señala Einstein es que en todo juicio en que intervenga el tiempo — por ejemplo, “este evento ocurrió en un instante de tiempo t ” — se encuentra implícito un juicio de simultaneidad — que en el ejemplo propuesto sería “el evento y la marca del instante t en mi reloj son acontecimientos simultáneos”.

21 Citado por Max Jammer en “Consideraciones en torno a las implicaciones filosóficas de la nueva física”, en G. Radnitzky y G. Andersson (editores), *Estructura y desarrollo de la ciencia*, Madrid, Alianza Editorial, 1984.

método de sincronización. Einstein utilizará como medio para sincronizar los relojes, rayos de luz²². Hay que recordar ahora que los rayos de luz tienen propiedades especiales: de acuerdo con el segundo postulado anteriormente enunciado, viajan siempre en el vacío a la misma velocidad, independientemente del movimiento de la fuente que los emite. Por otra parte, la velocidad de la luz resulta ser la velocidad más alta a la cual pueden viajar las interacciones entre cuerpos materiales. Al definir el tiempo con base en rayos de luz, se establece una relación estrecha entre orden temporal y orden causal de eventos conectados por rayos de luz²³. No es difícil imaginar a partir de lo que se ha dicho que el tiempo relativista tendrá propiedades particulares, diferentes de las que posee el tiempo absoluto clásico, que es necesario explorar.

Antes de entrar a examinar algunas de las principales consecuencias que se derivan de la definición que acabamos de exponer, conviene hacer algunas observaciones con relación al carácter mismo de la definición. Se trata de una definición operacional, es decir de una definición que no pretende caracterizar la naturaleza o la esencia de lo que define (como hace, por ejemplo, Newton en los enunciados sobre el tiempo y el espacio en los *Principia*) sino indicar una serie de procedimientos claros y en principio realizables para *medir* la entidad en cuestión²⁴. Esta queda prácticamente

22 El método es el siguiente: en el punto medio de la línea que une los dos relojes colocamos una fuente de luz que en un determinado momento envía un rayo de luz hacia cada reloj. En el momento en que cada rayo llega a su respectivo reloj éste se pone a marcar un tiempo prefijado de antemano.

23 H. Reichenbach explora esta conexión en su artículo "Philosophical significance of relativity" en *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, op.cit., pág.301 y sig.

24 P.W. Bridgman, uno de los principales defensores del operacionalismo, caracteriza de la siguiente manera el trabajo de Einstein alrededor de los conceptos de tiempo y espacio: "En primer lugar [Einstein] reconoció que el significado de un término debe ser buscado en las operaciones empleadas para realizar una aplicación del mismo. Si el término es tal que se aplica a situaciones físicas concretas, como "longitud" o "simultaneidad", entonces el significado debe ser buscado en las operaciones por las cuales la longitud de objetos físicos concretos se determina o en las operaciones por las cuales uno determina si dos eventos físicos concretos son simultáneos o no". Bridgman se queja de que este método, fructífero en la relatividad

reducida en su esencia al conjunto de procedimientos que la miden. Einstein, motivado seguramente por la aguda crítica de Mach, reconoce que la mecánica clásica ha operado bajo el supuesto tácito —derivado del carácter absoluto del tiempo y del espacio— de que si dos eventos distantes son simultáneos para un observador, deben serlo también para cualquier otro, independientemente de su estado de movimiento. Pero, ¿qué significa físicamente que dos eventos distantes sean simultáneos? Esta pregunta no recibió una respuesta explícita en la mecánica clásica; la indefinición en este aspecto no tuvo sin embargo repercusiones prácticas, en razón de las distancias cortas y de las velocidades pequeñas (comparadas con la velocidad de la luz) involucradas en los sistemas mecánicos. Podía trabajarse allí sin mayores problemas con la idea intuitiva, de sentido común, de simultaneidad. Einstein reconoce el vacío de rigor teórico en este aspecto de la mecánica de Newton y la necesidad de explicitar y precisar el concepto: “El concepto no existe para el físico hasta que él tiene la posibilidad de descubrir si se cumple o no en un caso concreto. Requerimos por lo tanto de una definición de simultaneidad que nos proporcione los medios para que, en el presente caso, él pueda decidir por experimento si los dos relámpagos ocurrieron simultáneamente. Mientras este requisito no esté satisfecho me expongo a ser engañado como físico (y naturalmente lo mismo ocurre si no soy físico) cuando imagino que puedo atribuirle un significado al juicio de simultaneidad”²⁵. Es posible rastrear en esta cita una influencia —producto tal vez de las lecturas de Hume y Mach²⁶— de tesis positivistas según las cuales los conceptos de la ciencia deben estar en correspondencia estrecha con referentes empíricos, de tal manera que puedan ser directamente

especial, haya sido abandonado por Einstein en la elaboración de la relatividad general. Véase P. W. Bridgman “Einstein’s theories and the operational point of view” en *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, *op.cit.*, pág.335.

25 Citado por Bridgman en “Einstein’s theories and the operational point of view” *op.cit.*, pág.335.

26 Einstein reconoce la influencia en su trabajo de estos dos autores en un escrito de 1916: “Puedo decir con certeza que el estudio de Mach y Hume ha sido directa e indirectamente de gran ayuda en mi trabajo [...] Mach reconoció los puntos débiles de la mecánica clásica y no estubo muy lejos de requerir una teoría general de la relatividad hace medio siglo [...]”. Citado por Philipp G. Frank en “Einstein, Mach y el positivismo lógico” en *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, *op.cit.*, pág..272.

traducidos a relaciones entre cantidades observables. Conviene notar cómo esta posición inicial de Einstein, que indudablemente incidió en su forma de abordar la elaboración de la relatividad especial, cambió luego notablemente a raíz de sus trabajos en relatividad general. El mismo Einstein ha señalado cómo “los filósofos naturales de aquellos días [siglos XVIII y XIX] estaban en su mayoría [...] poseídos por la idea de que los conceptos fundamentales y los postulados de la física no eran, en un sentido lógico, invenciones libres de la mente humana sino que podían ser deducidos de la experiencia por ‘abstracción’ —esto es por medios lógicos. Un reconocimiento claro del carácter erróneo de estas nociones sólo llegó realmente con la teoría general de la relatividad.[...] el carácter ficticio de los principios fundamentales se hace evidente del hecho de que podemos señalar dos principios esencialmente diferentes [los principios sobre la gravitación de Newton y Einstein], que corresponden ambos en gran medida con la experiencia[...]”²⁷.

Conviene resaltar otro aspecto interesante en la definición de la simultaneidad. Como toda definición, ésta conlleva también un cierto grado de arbitrariedad. Aunque es menester reconocer que desde un punto de vista práctico la definición es muy buena por cuanto involucra procedimientos

27 Citado por Philipp G. Frank en “Einstein, Mach, and Logical Positivism” en *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, *op.cit.*, pág.273. En este artículo Philipp Frank analiza los cambios en la posición epistemológica de Einstein con relación al positivismo lógico y también las influencias de las teorías de Einstein sobre esa corriente filosófica. Otra cita de Einstein, de 1921, con respecto a la relación entre ciencia y experiencia, más matizada que la reproducida en el texto es la siguiente: “El objeto de toda ciencia, ya sea ciencia natural o psicológica, es el de coordinar nuestras experiencias y someterlas a un sistema lógico [...] La única justificación para nuestros conceptos es que ellos sirven para representar el complejo de nuestras experiencias; más allá de esto no tienen legitimidad. Estoy convencido de que los filósofos han tenido un efecto nocivo sobre el pensamiento científico al separar ciertos conceptos fundamentales del dominio del empirismo, donde se encuentran bajo control, para llevarlos a las alturas intangibles del *a priori*. Porque incluso siendo claro que el universo de las ideas no puede ser deducido de la experiencia por medios lógicos, sino que es, en cierto sentido, una creación de la mente humana sin la cual ninguna ciencia es posible, sin embargo el universo de las ideas en tan poco independiente de la naturaleza de nuestras experiencias como los vestidos lo son de la forma del cuerpo humano. Esto es particularmente cierto de nuestras concepciones del tiempo y del espacio que los físicos se han visto obligados por los hechos a bajar del Olimpo del *a priori* para ajustarlas y ponerlas en condición de servir.” Citado por P. Frank, pág. 282.

realizables en muy diversas condiciones, es posible pensar en definiciones distintas: ¿por qué no usar ondas sonoras para sincronizar los relojes o bien un tercer reloj desplazándose entre los que deben ser sincronizados a una cierta velocidad prefijada? Es indudable que la utilización de cualquiera de estos procedimientos nos produciría un “tiempo” con características distintas aunque, en principio, siempre sería desde luego posible relacionarlo con el tiempo einsteiniano. Lo interesante es que dentro de la concepción de la mecánica clásica el tiempo absoluto, como entidad real, no puede estar sometido a ningún grado de arbitrariedad. Viene dado de antemano desde la creación. Habría que tratar tan sólo de poner en evidencia, a través de experimentos, esas características del espacio y del tiempo absolutos que se piensan como dadas²⁸. De hecho uno de los aspectos más revolucionarios de la teoría de la relatividad es el de haber propuesto que entidades concebidas anteriormente como sujetas a corroboración experimental debían ahora ser simplemente objeto de una definición²⁹. Esta manera de resolver un problema álgido evidencia el cambio radical de perspectiva introducido por la relatividad³⁰. El cambio de perspectiva hace a su vez que los resultados negativos de numerosos experimentos —el de Michelson y Morley es el más conocido de ellos— diseñados, dentro de los marcos de la perspectiva clásica, para probar el movimiento de la Tierra con respecto al éter, queden

28 De hecho, Newton intentó demostrar la existencia del espacio absoluto a través del célebre experimento del balde de agua. El experimento se basa en la idea, criticada más tarde por Mach, de que cualquier rotación con respecto al espacio absoluto produce fuerzas centrífugas mientras que éstas no aparecen en rotaciones que son solamente relativas a otros cuerpos. Véase I. Newton, *Principios matemáticos de la filosofía natural*, Madrid, Editora Nacional, 1982, “Escolio” pág.228.

29 Este aspecto, de interés epistemológico, ha sido puesto de relieve, desde el punto de vista de la lógica, por Hans Reichenbach en su artículo “The philosophical significance of the theory of relativity” en *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, op. cit., Vol I, pág.293. Dice Reichenbach: “La base lógica de la teoría de la relatividad es el descubrimiento de que muchos enunciados cuya verdad o falsedad era considerada como susceptible de una demostración eran meras definiciones”.

30 En la historia de la ciencia se pueden encontrar ejemplos similares en los cuales un problema crucial planteado dentro de los marcos de cierto paradigma, se convierte en una pregunta prácticamente sin sentido o trivialmente obvia al producirse un cambio de paradigma. Un ejemplo muy conocido, y sobre el cual autores como A. Koyré han

ahora sin piso al desaparecer la noción misma del éter. El resultado negativo de esos experimentos queda ahora explicado de una manera trivial³¹.

2. Las implicaciones del tiempo relativista

Volvamos ahora al análisis de algunas de las implicaciones de la nueva concepción del tiempo en la relatividad especial. La primera de ellas, revolucionaria con relación al concepto clásico, es que la simultaneidad de eventos distantes deja de ser absoluta³². Esto quiere decir que dos eventos pueden ser simultáneos —es decir, pueden ocurrir en el mismo instante, tal como estos instantes se miden usando relojes idénticos y sincronizados colocados en reposo en los lugares en que ocurren los eventos— para los observadores de un sistema inercial determinado pero dejan de serlo para observadores que se mueven con respecto a los primeros. Para éstos uno de los eventos ocurre antes que el otro y es siempre posible encontrar otros sistemas de referencia en los cuales el orden temporal se invierte. Evidentemente eventos de esta naturaleza —ocurriendo simultáneamente en algún sistema— no pueden estar causalmente conectados, ya que la

profundizado, es el de la ley de la inercia galileana. Un problema clave en la física aristotélica y medieval era el de las causas del movimiento. La noción de *impetus*, como "virtud" impresa en el móvil, se introdujo precisamente para dar una respuesta, así en gran medida ésta fuese sólo nominal, a ese problema. La ley de la inercia, que justamente por eso representa todo un cambio radical de perspectiva con relación al movimiento, corta de tajo el problema al afirmar que el movimiento (uniforme, rectilíneo, en la formulación newtoniana) es, al igual que el reposo, un *estado* del móvil en el cual éste puede permanecer indefinidamente. La única pregunta que tendrá ahora sentido es la de las causas de los *cambios* en el movimiento. Véase, A. Koyré, *Études Galiléennes*, Paris, Hermann, 1966, parte III: "Galilée et la loi d'inertie".

- 31 En el caso del experimento de Michelson y Morley, el resultado negativo queda ahora explicado trivialmente por el segundo postulado de la relatividad: la velocidad de la luz es la misma en todas direcciones y en todos los sistemas inerciales de referencia.
- 32 Puede mostrarse que si no existiese un límite para la velocidad máxima de propagación de las interacciones causales, la simultaneidad de eventos se haría absoluta. De hecho todas las fórmulas de la relatividad especial tienden a fórmulas correspondientes de la mecánica clásica si se hace tender la velocidad de la luz, c , al infinito.

velocidad límite de las interacciones es la velocidad de la luz en el vacío. No hay por lo tanto en esta inversión del orden temporal ninguna violación del principio de causalidad. En la terminología de la relatividad esta clase de eventos se denomina “como de espacio” (“space-like”). Hay otra clase de eventos, constituida por aquellos que en algún sistema de referencia ocurren en el mismo lugar pero en instantes diferentes. Estos eventos, que en ningún sistema son simultáneos, pueden estar causalmente conectados y su orden temporal no puede invertirse aunque el intervalo de tiempo que los separa pueda ser mayor o menor según el sistema de referencia en que se observan. Se denominan eventos “como de tiempo” (“time-like”).

Una segunda consecuencia importante del nuevo concepto relativista de tiempo es que las longitudes de los objetos en movimiento deben ser definidas involucrando la idea de simultaneidad³³. Espacio y tiempo quedan así estrechamente interrelacionados³⁴. La longitud de un objeto en movimiento resulta ser siempre menor que su longitud propia (la que tiene en el sistema de referencia en el cual se encuentra en reposo). También las dimensiones de los objetos dejan de tener un carácter absoluto e incluso su rigidez, característica evidente en la mecánica clásica pero que en realidad es una consecuencia de la suposición de una interacción instantánea entre los átomos del cuerpo, se vuelve ahora problemática. Hemos pasado a una física que pone el acento, más que en los objetos o en las partículas, en los eventos.

3. La mecánica relativista

Los fenómenos en la física relativista siguen siendo pensados, como los de la física clásica, de una manera estrictamente causal y determinista. Sin

33 La longitud de una regla en movimiento con respecto a un sistema inercial se define como la distancia, medida en el sistema inercial, entre marcas que coinciden *simultáneamente* con los extremos de la regla que se mueve.

34 Esta interrelación se expresa matemáticamente en las transformaciones que permiten relacionar las coordenadas espacio-temporales de un mismo evento en dos sistemas inerciales distintos (transformaciones de Lorentz). Las ecuaciones de transformación para las coordenadas espaciales involucran el tiempo y las transformaciones para el tiempo involucran las coordenadas. La interrelación también se expresa en el formalismo matemático del espacio-tiempo de cuatro dimensiones para expresar las leyes de la física relativista.

embargo ya no parece posible, ni siquiera de manera hipotética, concebir en ella, como sí lo fue en la mecánica clásica, un determinismo laplaciano³⁵. En efecto, con relación a un observador, situado en un determinado lugar y en un determinado momento, existen una infinidad de eventos del tipo “como de espacio”, que no pueden por lo tanto estar en ese momento causalmente conectados con el observador y sobre los cuales él no puede, por esa razón, saber nada pero que pueden influir causalmente sobre él (llegando así a conocerlos) en el futuro.

La nueva concepción sobre el espacio y el tiempo repercute sobre toda la mecánica. Es necesario reconstruirla modificando de manera radical conceptos básicos como los de masa y energía. La masa de una partícula ya no será, como en la física clásica, un parámetro que depende sólo de la naturaleza de la partícula misma³⁶. Ahora depende también de su velocidad y por lo tanto, a la vez, del estado de movimiento del observador que la mide. La masa de una misma partícula ya no tiene un único valor absoluto. Para observadores que se encuentren en sistemas de referencia distintos los valores de la masa también serán distintos. Pero indudablemente la transformación más revolucionaria en los conceptos de la dinámica es la que

35 El determinismo laplaciano afirma que si un intelecto (situado, claro está, en cierto lugar y en un determinado momento) pudiese conocer el estado de movimiento de todas las cosas y las fuerzas a las que están sometidas, entonces “nada sería incierto, y tanto el futuro como el pasado estarían presentes en su visión”. Véase, para una discusión sobre las posibilidades de un determinismo de tipo laplaciano en la relatividad, el artículo de Max Jammer “Consideraciones en torno a las implicaciones filosóficas de la nueva física” en *Estructura y desarrollo de la ciencia*, Madrid, Alianza Universidad, 1984, pág. 120.

36 En la mecánica relativista la masa se puede introducir definiendo primero, por analogía con la mecánica clásica, el momentum de una partícula como mv y exigiendo luego que en procesos de colisión entre partículas el momentum se conserve en todos los sistemas inerciales de referencia. Para que este requerimiento se satisfaga, es necesario que la masa sea una función continua de la velocidad que tiende al valor clásico de la masa para velocidades de la partícula mucho menores que la velocidad de la luz pero que tiende a un valor infinitamente grande cuando la velocidad de la partícula se acerca a la velocidad de la luz. Exposiciones claras de la mecánica relativista pueden encontrarse en Max Born, *Einstein's Theory of Relativity*, Dover, 1962, o en A. P. French, *Relatividad especial*, Editorial Reverté, 1974.

vincula estrechamente la masa de un sistema con su energía por medio de la célebre ecuación $E=MC^2$. La ecuación implica la equivalencia de los conceptos de masa y energía y la posibilidad práctica de convertir pequeñas cantidades de masa en grandes cantidades de energía.

Estas ideas han recibido numerosas corroboraciones experimentales. Lo interesante es que, a pesar de la posición epistemológica de Einstein en ese momento en favor de las ideas del positivismo, todos estos resultados surgen no de una extrapolación empírica sino como consecuencia lógica de los postulados y de las definiciones básicas de la teoría. Por lo demás el desarrollo de la relatividad tiene su motivación no en la acumulación de un conjunto de datos experimentales carentes de una interpretación adecuada, sino en las inconsistencias teóricas de la física clásica. La corroboración empírica de la relatividad se produjo después de que sus resultados se encontraban establecidos de manera teórica. Es cierto que, independientemente de la corroboración, la teoría de la relatividad presenta algunas características que podrían hacer presumir de antemano que se trata de una "buena" teoría. En primer lugar, las leyes y reglas de la cinemática y de la dinámica relativista se reducen a las leyes y reglas correspondientes de la mecánica clásica para velocidades pequeñas comparadas con la velocidad de la luz. La mecánica clásica ha recibido abundante corroboración experimental para tales velocidades. En segundo lugar, la relatividad mantiene sin modificación alguna, como ya lo hemos señalado, las *relaciones matemáticas* de la electrodinámica de Maxwell, teoría que ofrece una comprensión sintética y unificada de los fenómenos eléctricos y magnéticos, y que logró predecir con exactitud un espectro muy amplio de fenómenos. La relatividad ofrece, eso sí, una interpretación más abstracta de esta teoría, considerando los campos electromagnéticos como entidades matemáticas que pueden relacionarse con las fuerzas y descartando toda imagen mecanicista con base en el éter.

Resulta claro, de lo expuesto hasta ahora, que en la relatividad especial el significado de algunos de los conceptos más básicos de la física ha sufrido un cambio radical. También han cambiado, en consecuencia, las relaciones mutuas entre todos estos conceptos. ¿Es posible caracterizar globalmente el sentido de esta transformación? Podría decirse que con la relatividad se ha producido un cambio en lo que se entiende como el referente objetivo de ciertos conceptos fundamentales. Conceptos como los de tiempo y espacio absolutos, si bien alejados de toda experiencia empírica directa, son pensados en la mecánica de Newton como caracterizaciones de una realidad objetiva externa. En la relatividad en cambio estos conceptos se relacionarán más bien con procedimientos físicamente realizables que, justamente por esta

razón, adquieren un significado empírico más claro. Desde luego la idea misma de estos procedimientos está estrechamente condicionada por una necesidad natural que se expresa en ciertas leyes básicas de la física. Pero hay sin embargo en los procedimientos un elemento de arbitrariedad que impide pensar los conceptos que de allí se derivan como una caracterización directa de realidades sustanciales. Algo similar ocurre con el concepto de masa que en la mecánica clásica, aunque claramente diferenciado de la cantidad de materia, se piensa sin embargo como la representación de una característica indisolublemente ligada a la materia. La relatividad flexibiliza esta concepción. La masa depende ahora tanto de la partícula a la cual se asocia como del estado de movimiento relativo entre el sistema desde el cual se observa y el corpúsculo. Incluso la masa en reposo se asocia ahora con una energía de reposo, abriéndose así la posibilidad de pensar procesos en los cuales la masa ya no se conserva pudiéndose transformar en energía. Podría decirse que la relatividad introduce un cambio en la forma como la relación entre el concepto y la realidad es pensada. Se agudiza la conciencia de que la teoría se relaciona más con experimentos posibles que con realidades inmutables.

II. Las ideas cuánticas a comienzos de siglo

La mecánica cuántica tuvo un origen y un desarrollo histórico que fueron marcadamente distintos de los que experimentó la relatividad. Mientras que el surgimiento de esta última teoría está precedido y motivado ante todo por un análisis riguroso de conceptos, como los de espacio y tiempo, considerados fundamentales pero carentes de un referente empírico adecuado y por un examen de contradicciones internas y fallas en la coherencia de las teorías clásicas, la teoría de los cuantos tiene su origen en la acumulación gradual de hechos empíricos, de resultados de nuevos experimentos, que no logran encontrar una explicación rigurosa dentro de los marcos de la física clásica. Por otra parte los principios básicos de la teoría de la relatividad, tanto de la teoría especial como de la general, son esencialmente el fruto del esfuerzo de un solo hombre, Einstein. La teoría especial, en particular, aparece prácticamente, desde el primer artículo de 1905, estructurada en su forma definitiva. La mecánica cuántica, por el contrario, es el fruto de un esfuerzo colectivo mucho más prolongado durante el cual los principios centrales de la teoría sólo se van decantando lentamente a través de una serie de esfuerzos parciales y de hipótesis *ad hoc* que se van afinando y corrigiendo.

En esta sección intentaremos un examen sucinto del surgimiento de las ideas cuánticas a comienzos de siglo. Nos ocuparemos en primer lugar del

análisis de algunas de las formas más características que adoptan las hipótesis del cuanto de energía y de la cuantización, introducidas para dar cuenta de nuevos hechos experimentales en los primeros quince años de este siglo. En segundo lugar examinaremos brevemente algunos de los desarrollos que, a partir de una reflexión sobre la dualidad onda-partícula, conducen a la formulación de la mecánica ondulatoria. Finalmente expondremos algunos de los rasgos más sobresalientes de la interpretación probabilista de la mecánica cuántica, indicando también algunos de los problemas que suscita esta interpretación. La literatura sobre la historia y los problemas de interpretación de la mecánica cuántica es muy abundante. Sólo pretendemos en este estudio indicar las líneas más gruesas del desarrollo conceptual de esta nueva teoría e introducir al lector en algunos de los problemas inherentes a la interpretación estadística de la misma.

A) El cuanto de energía y las primeras hipótesis cuánticas

En la física clásica, tanto en la mecánica como en la electrodinámica, se considera que las cantidades físicas que permiten describir los estados de sistemas de partículas y campos pueden en general variar de manera continua. La velocidad de una partícula, por ejemplo, puede tomar, en la mecánica de Newton, cualquier valor positivo o nulo. Además cualquier variación de la velocidad de la partícula, inducida por la aplicación de fuerzas, se da de manera continua de tal manera que si el móvil pasa de una velocidad inicial v_0 a una velocidad final v , debe haber tomado sucesivamente, durante el proceso todas las velocidades intermedias³⁷. Matemáticamente este hecho se expresa en las ecuaciones de movimiento que toman la forma de ecuaciones diferenciales que admiten como solución funciones continuas del tiempo. Otra cantidad continua de la física clásica —la primera que será cuantizada en los trabajos pioneros de Max Planck a comienzos de siglo—

37 Galileo, antes de Newton, era ya perfectamente consciente de este hecho y lo explicita en detalle, ya que no se trataba de algo evidente en la física medieval. Para poder llegar a formular de manera precisa la idea de la continuidad del movimiento se requería en primer lugar haber aceptado como válida la posibilidad de una descripción matemática del movimiento de tal manera que conceptos físicos como los de cambio de velocidad o desplazamiento pudiesen asimilarse a cambios continuos de variables matemáticas. Véanse las *Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias*, Editora Nacional, Jornada Tercera.

es la energía total de un sistema de partículas y campos. De nuevo, para un determinado sistema físico, esta cantidad no sólo puede tomar en general, en la física clásica, un amplio rango de valores positivos o negativos sino que, como en el caso de la velocidad, estos valores varían de manera continua. Algo similar ocurre con otras cantidades físicas como son la posición, el momentum, el momentum angular, las corrientes eléctricas, los potenciales eléctricos, la magnitud de los campos eléctricos y magnéticos etc. En clara contradicción con la visión clásica, fue necesario introducir a comienzos de siglo, por primera vez en la física, la idea de que la energía de determinados sistemas físicos no puede variar de manera continua sino por saltos abruptos entre ciertos valores discretos. El fenómeno que indujo por primera vez la introducción de esta hipótesis es el así llamado problema de la radiación de cuerpo negro. Comenzaremos haciendo un breve análisis del mismo.

1. El problema de la radiación del cuerpo negro

En razón de algunas características sobresalientes del fenómeno, que expondremos más adelante, el problema de la radiación del cuerpo negro acaparó la atención de algunos de los mejores físicos de la segunda mitad del siglo XIX. Pero, ¿qué es la radiación del cuerpo negro? La emisión de luz por cuerpos calientes es un hecho de observación común (piénsese, por ejemplo en un trozo de hierro al rojo o en el filamento de una bombilla). Menos evidente, pero no menos cierto, es que todos los cuerpos sólidos a cualquier temperatura por encima del cero absoluto emiten y absorben radiación. La mayor parte de la radiación emitida por cuerpos a temperatura ambiente no pertenece sin embargo al espectro visible. La cantidad de energía radiada y la calidad de la misma (es decir, la distribución de su intensidad en las diferentes frecuencias del espectro) dependen en una forma muy evidente de la temperatura a la cual se encuentra el cuerpo emisor y pueden depender también de otros parámetros como son el material del cual está hecho el cuerpo, el estado de su superficie, etc. Cuando un cuerpo se encuentra en equilibrio térmico con el medio ambiente, es decir, cuando su temperatura permanece constante, el cuerpo emite por unidad de tiempo tanta energía radiante como la que absorbe del medio ambiente. Las frecuencias privilegiadas a las cuales el cuerpo absorbe y emite radiación son en general distintas. Un cuerpo negro —denominación ésta introducida por Kirchhoff— es un cuerpo hipotético que absorbería perfectamente toda la radiación que incide sobre él. En equilibrio térmico este cuerpo sería también el mejor emisor posible. Kirchhoff en 1860 muestra de manera teórica, usando consideraciones basadas en la segunda ley de la termodinámica, que la intensidad total y la calidad de la radiación emitida

por un cuerpo negro a cierta temperatura T son idénticas a las de la radiación contenida en una cavidad que se encuentre en equilibrio térmico a esa misma temperatura T . Kirchhoff demuestra también teóricamente, con base en la segunda ley de la termodinámica, ciertas características importantes de la radiación térmica en la cavidad: la calidad y la intensidad de esta radiación no dependen del material del cual está hecha la cavidad ni de la forma o tamaño de la misma; la intensidad de la radiación para cada longitud de onda es la misma en todos los puntos de la cavidad (la radiación es homogénea) y en todas las direcciones (la radiación es isotrópica)³⁸. En otras palabras, el único parámetro del cual dependen todas las propiedades de la radiación de cuerpo negro, idéntica repitámoslo a la radiación en equilibrio térmico contenida dentro de una cavidad, es la temperatura. Estamos pues ante un fenómeno con características de universalidad. Por esta razón, es plausible pensar que las propiedades de este fenómeno se relacionan estrechamente con las leyes básicas que gobiernan los procesos de intercambio de la radiación con la materia. La percepción de este hecho importante es indudablemente lo que atraerá el interés de muchos físicos, entre ellos Max Planck, hacia el estudio de este fenómeno en la segunda mitad del siglo XIX.

Los trabajos iniciales de Kirchhoff permitan plantear dos preguntas centrales que tienen que ver, la primera, con la energía total radiada y, la segunda, con la distribución espectral de la radiación. En primer lugar, ya que la radiación no depende sino de la temperatura, ¿cuál es la expresión matemática que nos permite calcular la intensidad total de la radiación emitida por el cuerpo negro en función de la temperatura? En segundo lugar, ¿cómo se distribuye la energía de la radiación entre las diferentes frecuencias presentes? o en otros términos ¿qué función universal de la temperatura me da la intensidad radiada en cada intervalo de frecuencia?

El primero de los interrogantes fue respondido de manera experimental en 1879 por Stefan, quien encontró que la intensidad total de la radiación emitida por un cuerpo negro es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta. Este resultado será demostrado teóricamente, también con base en consideraciones termodinámicas, por Boltzmann en 1884.

El segundo interrogante habría de resultar mucho más problemático y en

38 La idea de la demostración de estas propiedades puede encontrarse en Richtmyer, Kennard and Lauritsen *Introduction to Modern Physics*, McGraw-Hill, 1955.

el proceso hacia su resolución Planck llegaría a la primera hipótesis cuántica. No nos adentraremos en los detalles complejos de las numerosas contribuciones a este problema³⁹. A pesar de los importantes esfuerzos de Wien, quien en 1894 logra encontrar por métodos termodinámicos las condiciones generales que debe cumplir la función matemática que relaciona la intensidad para cada frecuencia con la temperatura, se hizo evidente que esta última función sólo podría obtenerse trabajando los detalles del proceso de intercambio entre la radiación y la materia. Modelos clásicos como los de Wien y Rayleigh, además de presentar inconsistencias teóricas, se mostraron a la postre incapaces de dar cuenta de los datos experimentales conocidos a comienzos de este siglo.

Planck trabajará intensamente en este problema durante la última década del siglo pasado motivado, como el mismo lo confiesa⁴⁰, por las características de universalidad que presenta el fenómeno. Apoyándose en el hecho de que las propiedades de la radiación son independientes de la constitución material de la cavidad, Planck trabajará un modelo en el cual se supone que los átomos de las paredes que absorben y emiten la radiación son osciladores armónicos que tienen una determinada frecuencia propia de oscilación. En sus esfuerzos por encontrar, con base en este modelo, una fórmula para la intensidad espectral de la radiación en la cavidad como función de la temperatura que concordara con los resultados experimentales conocidos, Planck se ve obligado a suponer, en un trabajo de 1900⁴¹, que la energía no se distribuye de manera continua entre los osciladores, como sería de esperar en la física clásica, sino que por el contrario cada uno de ellos sólo puede poseer una cantidad de energía que sea un múltiplo de cierto cuanto de energía e . Fue además necesario suponer que este cuanto de energía era proporcional a la frecuencia propia f de cada oscilador: $e=hf$. En esta fórmula, h es una constante universal —conocida hoy en día como la

39 Los detalles del desarrollo histórico de este importante problema pueden encontrarse en Thomas S. Kuhn *La teoría del cuerpo negro y la discontinuidad cuántica, 1894-1912*, Madrid, Alianza Universidad, 1980, y en Max Jammer, *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, *op.cit.*, Cap.1.

40 Véase, Max Jammer, *op.cit.*, Cap.I pág. 10.

41 Se trata del trabajo titulado "Acerca de la teoría de la ley de distribución de energía del espectro normal", leído el 14 de diciembre de 1900 ante la Sociedad Alemana de Física.

constante de Planck— que Planck calculó ajustando la curva teórica a la experimental⁴².

En un comienzo ni Planck ni sus contemporáneos podían comprender las consecuencias revolucionarias de largo alcance de la hipótesis que acababa de ser introducida en la física. Como lo señala Max Jammer, “en ese momento Planck aparentemente no estaba muy seguro de si la introducción de h era tan sólo un mero artificio matemático o si expresaba una innovación fundamental de profundo significado físico”⁴³. El mismo Planck habla de la introducción de la hipótesis como de “un acto de desesperación” realizado en razón de que “una explicación teórica tenía que ser suministrada a toda costa, a cualquier precio”⁴⁴. Planck hará esfuerzos repetidos, aunque infructuosos, por hacer encajar de alguna manera el cuanto de energía y la nueva constante h dentro de los marcos de la física clásica. La extraña hipótesis cuántica introducida por Planck en 1900 dejó de ser, para la comunidad de los físicos, un mero artificio matemático *ad hoc* sólo cuando algunos hombres de ciencia comenzaron a aplicarla, adaptándola, para explicar otros fenómenos que reñían con la física clásica.

42 Vale la pena reproducir un texto en el que Planck explica la forma como introduce el cuanto de energía: “Debemos considerar ahora la distribución de energía entre cada tipo de resonador [oscilador], en primer lugar la distribución de energía E entre los N resonadores de frecuencia f . Si consideramos a E infinitamente divisible, entonces son posibles un número infinito de distribuciones diferentes. Nosotros, sin embargo, suponemos —y ese es el punto esencial— que E está compuesta de un número determinado de partes finitas iguales y empleamos en su determinación la constante natural $h=6,55 \times 10^{-27}$ (ergios x seg). Esta constante multiplicada por la frecuencia del resonador, da el elemento e en ergios, y dividiendo E por e obtenemos el número P de elementos de energía a distribuir entre los N osciladores”. Citado por Thomas S. Kuhn, *op. cit.*, pág. 130.

Conviene señalar cómo las consideraciones teóricas de Planck no estaban tampoco exentas de contradicciones internas. El primero en señalarlas fue Einstein en 1906. Planck usa en su deducción, por una parte, expresiones que se basan en la teoría electromagnética de Maxwell y en la suposición implícita de que la energía de los osciladores es una cantidad que varía de manera continua y, por otra, esta misma energía es tratada luego como una cantidad que sólo puede asumir valores discretos, múltiplos de hf . Véase Max Jammer, *op.cit.*, pág.26.

43 Ver Max Jammer, *op. cit.*, Cap. I, pág.22.

44 *Ibid.*

2. El efecto fotoeléctrico

Uno de los primeros físicos que retomó las ideas de Planck, para aplicarlas al estudio de otros fenómenos, fue Albert Einstein. En un artículo de 1905⁴⁵. Einstein muestra cómo una versión modificada de la hipótesis cuántica de Planck permite explicar en una forma muy sencilla los principales rasgos de un fenómeno experimental que había desafiado hasta entonces una explicación dentro de los marcos de la física clásica: el efecto fotoeléctrico⁴⁶. Este efecto consiste en la emisión de electrones por ciertas superficies metálicas cuando sobre ellas incide luz de determinadas frecuencias. Una medición cuidadosa de los rasgos sobresalientes de este efecto mostraba, entre otras cosas, 1. que la energía máxima de los fotoelectrones eyectados no dependía de la intensidad de la luz incidente sino tan sólo de su frecuencia; 2. que para un determinado material existía una frecuencia umbral por debajo de la cual el efecto no se producía; 3. que los fotoelectrones comenzaban a ser eyectados en el momento mismo en que incidía luz de frecuencia apropiada, incluso cuando la intensidad de ésta era muy débil. Resultaba muy difícil explicar estas características sobre la base del modelo clásico que supone que la luz es una onda electromagnética, cuya intensidad depende directamente de su campo eléctrico y cuya energía se distribuye espacialmente en los frentes de onda. Clásicamente se hace necesario suponer que la onda incide sobre los electrones del material e incrementa gradual y continuamente la energía cinética de éstos hasta que logran superar las barreras de potencial que los ligan a la superficie del sólido y se desprenden de éste. En la explicación clásica, la energía máxima de los fotoelectrones, contrariamente a lo que se observa, debería depender de manera muy determinante de la intensidad de la luz incidente y no tanto de la frecuencia de la luz. Deberían esperarse también intervalos de tiempo largos entre la llegada de la luz a la superficie y la emisión de electrones para intensidades luminosas muy pequeñas ya que los electrones deberían ir acumulando energía continuamente durante cierto tiempo hasta poder salir.

Einstein se da cuenta de que las características más sobresalientes del

45 El artículo se titula "Sobre un punto de vista heurístico concerniendo la producción y transformación de la luz" y fue publicado en los *Annalen der Physik*, No. 17 (1905).

46 Para la historia de las investigaciones sobre este efecto, véase Max Jammer, *op. cit.*, págs.33-37, y Richtmyer, Kennard y Lauritsen, *op. cit.*, Cap.3.

fenómeno pueden ser fácilmente explicadas si se adapta la hipótesis de Planck en una forma original, suponiendo que la energía en la onda electromagnética no se distribuye de manera continua en los frentes de onda, como lo requiere la teoría electromagnética clásica, sino que se concentra en paquetes discretos, espacialmente localizados, que pueden ser absorbidos por los electrones en forma cuantizada y discontinua. La magnitud de la energía de cada uno de estos paquetes discretos resulta ser justamente el cuanto de energía de Planck: $e=hf$. Se supone que cada una de estas “partículas de luz”, que más adelante se llamarán fotones, puede interactuar con un electrón comunicándole en el mismo instante de la interacción toda su energía. El electrón adquiere así una cantidad de energía $e=hf$. No es extraño entonces que la máxima energía de los electrones dependa de la frecuencia de la luz, ni tampoco que la eyección de los primeros electrones se produzca instantáneamente. También es claro que para frecuencias muy pequeñas de la luz la energía hf que se le comunica a cada electrón puede ser insuficiente para que éste pueda salir del material. Se explicaría así la existencia de una frecuencia umbral.

Es interesante contrastar la hipótesis de los fotones de Einstein con la hipótesis cuántica de Planck. Es claro, en primer lugar, que existen diferencias notables. El cuanto de energía de Planck se aplica a la energía de los osciladores que pueden recibir solamente energías que sean múltiplos enteros de hf . Einstein en cambio aplica el carácter discreto de las energías directamente a las ondas electromagnéticas, suponiendo que éstas están, de alguna manera, constituidas por “corpúsculos” de energía hf . En ambas hipótesis se supone que la interacción de la radiación con la materia (ya sea con los osciladores de Planck o con los electrones) transfiere abruptamente tan sólo cuantos de energía hf .

Aunque el tratamiento de Einstein logra explicar en una forma sorprendentemente sencilla los rasgos más contradictorios del efecto fotoeléctrico, la hipótesis de los fotones no está exenta de problemas. De hecho, tal vez la extraordinaria importancia que tuvo para la física residió justamente en los nuevos interrogantes que abrió. La explicación de Einstein replantea nuevamente, aunque en un contexto completamente distinto, la vieja pregunta: ¿Es la luz una onda o un flujo de partículas? En la física clásica, desde los tiempos de Newton, las dos imágenes de la luz han sido vistas como excluyentes la una de la otra: la luz debe ser una onda o un flujo de partículas pero no las dos cosas al mismo tiempo. Lo que resulta extraño en la hipótesis de Einstein es que implícitamente la luz, de alguna manera, debe ser las dos cosas al mismo tiempo; debe ser una onda, con una cierta frecuencia f , y al mismo tiempo un flujo de fotones. De hecho la energía hf

de estos fotones no podría calcularse si no se le pudiese asociar a la luz una frecuencia y si no tuviese por lo tanto las características periódicas de una onda. Tal parece que el ente que llamamos luz debe pensarse ahora asociado a dos aspectos complementarios (un carácter ondulatorio y un carácter corpuscular) que se manifiestan alternativamente en experimentos de distinta clase. En experimentos de interferencia y difracción la luz se muestra como una onda pero en experimentos en los cuales la luz interactúa con la materia, con los electrones o con los osciladores, se pone de manifiesto su carácter corpuscular. El trabajo de Einstein plantea por primera vez, para el caso de la luz, el problema de la dualidad onda-corpúsculo que habrá de resultar más adelante muy fructífero en la reflexión que conducirá a la mecánica ondulatoria.

3. Los espectros atómicos y el átomo de Bohr

Al tratar el fenómeno de la radiación del cuerpo negro hemos señalado cómo los cuerpos sólidos, a cualquier temperatura por encima del cero absoluto, emiten un espectro continuo de radiación. Los gases también pueden emitir luz aunque no lo hacen bajo condiciones normales de temperatura. Es necesario excitarlos, por medio de una chispa o de una llama. Ahora bien, desde el siglo pasado se sabía que los espectros de los gases tienen propiedades marcadamente distintas de las que presenta la radiación de los cuerpos sólidos. En lugar de ser espectros continuos resultan ser discretos, es decir conformados por una serie de líneas separadas con frecuencias bien definidas. Una gran cantidad de trabajo empírico realizado a finales del siglo pasado y comienzos del presente logró mostrar, para gases atómicos de distintos elementos, que las líneas espectrales se agrupan en series y permitió en varios casos establecer fórmulas empíricas a partir de las cuales se podían obtener las frecuencias de las líneas de una misma serie. El problema teórico que esta masa de información planteaba era el de poder deducir las fórmulas empíricas para las series a partir de modelos atómicos que incluyesen mecanismos de emisión de radiación por los átomos. Los distintos modelos atómicos clásicos (como el átomo de J.J. Thomson, por ejemplo) no permitieron llegar a las fórmulas empíricas. El carácter discreto de las líneas podía lograrse en estos modelos suponiendo dentro del átomo cargas oscilantes (osciladores armónicos) a determinada frecuencia. Resultaba sin embargo prácticamente imposible explicar por qué se obtienen un número infinito de líneas discretas (infinito número de frecuencias que sólo resultaría plausible clásicamente suponiendo un número infinito de

osciladores, cada uno con su frecuencia propia) y por qué estas líneas se agrupan en series⁴⁷.

Bohr, en 1913, elabora un modelo atómico para el átomo de hidrógeno que recurre a la idea del cuanto, en lugar de las cargas oscilantes con frecuencia propia, para explicar el carácter discreto de las líneas del espectro⁴⁸. Logrará también deducir teóricamente, con una sorprendente exactitud, las fórmulas empíricas que, para el átomo de hidrógeno, expresan la agrupación de las líneas espectrales en series. Aunque ya estaba implícita en el trabajo inicial de Planck, el modelo de Bohr introducirá de manera explícita la idea de la cuantización de las energías de un sistema físico y la necesidad de establecer reglas para lograr esta cuantización.

Bohr basa su trabajo en un modelo planetario elaborado por Rutherford que pudo dar cuenta, de manera muy satisfactoria, de los resultados de ciertos experimentos de dispersión de partículas α por láminas delgadas de material pero que predecía para el átomo un espectro continuo de radiación que, además de reñir con los hechos de experiencia, conducía a una inestabilidad inaceptable en la estructura del átomo⁴⁹. Niels Bohr retomará el modelo planetario pero postulará que el electrón del átomo sólo puede girar en ciertas órbitas bien definidas que Bohr denominó “estados estacionarios”. En palabras del mismo autor las “suposiciones principales” del modelo son:

“(1) Que el equilibrio dinámico de los sistemas en los estados estacionarios puede ser discutido con la ayuda de la mecánica ordinaria, mientras que el paso del sistema entre diferentes estados estacionarios no puede ser tratado sobre esta base.”

47 Para una historia de estos desarrollos véase Max Jammer, *op.cit.*, cap. 2.

48 El artículo original de Niels Bohr titulado “Sobre la constitución de átomos y moléculas” puede consultarse en D. Ter Haar, *The Old Quantum Theory*, Pergamon Press, 1967, pág. 132.

49 Rutherford establece la explicación de los resultados de los experimentos de dispersión sobre la base de un modelo planetario de átomo en 1911. El artículo de Rutherford titulado “La dispersión de partículas α y β por la materia y la estructura del átomo” se reproduce en D. Ter Haar, *The Old Quantum Theory*, Pergamon Press, 1967, pág. 108.

“(2) Que este último proceso viene acompañado por la emisión de radiación *homogénea*, para la cual la relación entre la frecuencia y la cantidad de energía emitida es la que se da en la teoría de Planck”⁵⁰

Estas dos suposiciones están en flagrante contradicción con la electrodinámica clásica. El “equilibrio dinámico” del cual se habla en la primera de ellas implica un movimiento del electrón en una órbita alrededor del núcleo. Este movimiento, según la teoría de Maxwell, debería generar radiación de energía electromagnética y conduciría por lo tanto a una inestabilidad en la órbita. Bohr supone, por el contrario, que el electrón en un estado estacionario no radía. La segunda suposición prevee un mecanismo, sin antecedentes en la física clásica, para la radiación electromagnética del átomo: el electrón emite un cuanto de radiación de energía $e=hf$ cuando “salta” de un estado estacionario a otro.

Ahora bien, entre la infinidad de posibles órbitas circulares que predice la mecánica clásica para el sistema planetario sólo algunas serán, según el modelo de Bohr, realmente posibles. ¿Cómo establecer cuáles son esas órbitas? Para lograrlo Bohr introduce en su artículo una regla de cuantización para la energía W del electrón, de tal manera que $W=(1/2)nhw$, donde n es un número entero, h es la constante de Planck y w es la velocidad angular del electrón en su órbita circular. Esta regla de cuantización, junto con los resultados de la mecánica clásica, permite obtener el radio de las órbitas de los estados estacionarios y la energía cuantizada del electrón en esas órbitas solamente en términos de constantes universales y de números enteros.

Aunque claramente expresadas, todas estas suposiciones de Bohr carecen de justificación en términos de una teoría más comprensiva. La gran virtud del átomo de Bohr, al igual que la teoría de Einstein sobre el efecto fotoeléctrico, es que logra reproducir muy bien los datos experimentales y las fórmulas empíricas para el espectro del átomo de hidrógeno. Este hecho puede considerarse como un indicio de que algunos de los rasgos esenciales del modelo apuntan a comportamientos fundamentales de la realidad cuántica.

Los intentos de generalización de los procedimientos empleados por Bohr en su tratamiento del átomo de hidrógeno, conducirán a la formulación de lo que se ha llamado “la vieja mecánica cuántica” (“The Old Quantum

50 Niels Bohr, “On the constitution of atoms and molecules” en D. Ter Haar, *op.cit.*, pág. 139.

Theory”). Este intento de sistematización teórica es esencialmente un híbrido entre la mecánica clásica, usualmente en sus formulaciones más avanzadas, y ciertas reglas de cuantización que permiten determinar los niveles de energía permitidos para algunos sistemas cuánticos. La radiación se produce por el mecanismo de los saltos cuánticos entre niveles de tal manera que $E=hf$.⁵¹

La idea dominante en esta primera fase del desarrollo de la física cuántica es la del *cuanto de energía*. Esta idea será aplicada de manera muy flexible y variada a distintas situaciones físicas. Planck cuantiza la energía de los osciladores. Esta idea lleva implícita una concepción sobre la interacción entre la radiación y la materia según la cual los intercambios de radiación se producen también cuantizadamente. Einstein al percatarse de este hecho postula directamente una distribución por cuantos en la energía de las ondas electromagnéticas. Aparece así por primera vez el carácter dual de la luz. Bohr al aplicar la idea del cuanto de energía al átomo de hidrógeno se ve obligado a cuantizar también otras cantidades físicas como son el radio de las órbitas o el momento angular de los electrones y a suponer la existencia en el átomo de ciertos “estados estacionarios” en los cuales, en abierta contradicción con la electrodinámica de Maxwell, el electrón no emite radiación.⁵²

B) La dualidad onda-partícula y la mecánica ondulatoria

1. El trabajo de Louis de Broglie

De Broglie parte, en sus trabajos sobre la mecánica ondulatoria, de una reflexión sobre los desarrollos de Einstein a propósito del efecto fotoeléct-

51 Aunque “la vieja mecánica cuántica” se considera hoy en día completamente superada, se puede tener una idea de lo que esa teoría logró hacer en el tratamiento de sistemas atómicos consultando el libro de Max Born *The Mechanics of the Atom*, New York, Frederick Ungar Publishing Co., 1960.

52 Vale la pena señalar que los efectos y modelos que hemos presentado en este aparte no son los únicos en los que se aplicó la idea del cuanto de energía de Planck. Otro modelo notable fue el que desarrolló Einstein en 1906 para explicar resultados experimentales sobre la variación del calor específico de los cuerpos sólidos con la temperatura. Véase Max Jammer, *op. cit.*, pág.57 y sigs.

trico, en los cuales se plantea por primera vez que la luz presenta, en determinados experimentos, las propiedades de un flujo de partículas. La conclusión de Einstein conduce a atribuirle al campo electromagnético un carácter dual: de alguna manera la luz *es* una onda y también *es* un flujo de fotones. La idea audaz de Louis de Broglie fue la de intentar extender la dualidad onda-corpúsculo al caso de todas las partículas subatómicas (electrones, protones etc.)⁵³.

Buscando desarrollar esta idea, de Broglie encontrará apoyo en los trabajos elaborados por Hamilton en el siglo pasado. Por analogía con la óptica geométrica, que se puede considerar como una aproximación de una teoría más general, la óptica ondulatoria, válida cuando los obstáculos o los cuerpos por los que atraviesa la luz son mucho más grandes que su longitud de onda, Hamilton intenta pensar la mecánica de las partículas como un caso límite de una teoría más general que sería también ondulatoria. En el momento en que fue propuesta, la teoría de Hamilton fue vista como una simple analogía formal sin contenido físico. El trabajo de de Broglie buscará llenar este vacío⁵⁴. Su idea es que toda partícula debe estar acompañada de un fenómeno ondulatorio de tal manera que la onda, cuya naturaleza permanece de momento desconocida, de alguna manera “guía” el movimien-

53 De Broglie expresa así su idea inicial: “La idea de base de la mecánica ondulatoria fue la siguiente: puesto que la experiencia ha revelado que, para la luz, existe un aspecto corpuscular y un aspecto ondulatorio de los fenómenos ligados entre sí por la relación $W=hf$, donde figura la constante h de Planck, se puede pensar que podría existir para las partículas de materia un aspecto corpuscular y un aspecto ondulatorio (este último desconocido por largo tiempo) que estarían ligados entre sí por una relación en la cual figuraría la constante de Planck”. Véase Louis de Broglie, *Éléments de théorie des quanta et de mécanique ondulatoire*, Paris, Gauthier-Villars, 1959, pág. 145. El trabajo original de Louis de Broglie fue publicado en 1923 bajo el título “Ondes et quanta” (“Ondas y cuantos”).

54 De Broglie expresa de la siguiente manera la importancia del trabajo de Hamilton para la mecánica ondulatoria: “La gran analogía formal entre la ecuación de Jacobi en su forma condensada y la óptica geométrica, analogía que se traduce en la identidad de forma de los principios de Maupertuis [para la mecánica] y de Fermat [para la óptica geométrica], había impresionado, hace más de un siglo, el espíritu penetrante del geómetra escocés Hamilton, pero es solamente el desarrollo de la teoría de los cuantos el que permite darle un sentido físico a esta analogía formal”. *Ibid.*, pág. 155.

to corpuscular. “Fui conducido [dice de Broglie] a buscar una visión sintética de la dualidad de las ondas y de los corpúsculos [...] buscaba representarme el corpúsculo como una especie de accidente local, de singularidad, en el seno de un fenómeno ondulatorio extenso”⁵⁵. De Broglie reconoce que, según la dualidad propuesta, las partículas subatómicas deberían manifestar, como ocurre en el caso de la luz, efectos de interferencia y difracción al pasar entre obstáculos⁵⁶.

Uno de los resultados más importantes del trabajo de de Broglie lo constituyen las relaciones matemáticas entre los aspectos dinámicos del corpúsculo y los aspectos ondulatorios de la “onda piloto”. Estos resultados se sintetizan en las así llamadas relaciones de de Broglie: $E=hf$ y $p=h/\mu$, donde E y p son la energía y el momentum de la partícula respectivamente y f y μ representan la frecuencia y la longitud de onda de la onda asociada.

2. El trabajo de Erwin Schrödinger

Erwin Schrödinger elaborará las ideas de de Broglie hasta llegar a la formulación matemática de una teoría coherente, aunque no exenta de dificultades de interpretación, para los fenómenos cuánticos⁵⁷. Schrödinger expresa el sentimiento de insatisfacción y de perplejidad, compartido por muchos físicos, con relación a la “vieja mecánica cuántica”, de la siguiente manera: “La situación era bastante desesperada. Si hubiesen fallado por

55 Louis de Broglie, *La théorie de la mesure en mécanique ondulatoire*, Paris, Gauthier-Villars, 1957, Cap. IV, pág.43.

56 El fenómeno de la difracción de un haz de electrones por un cristal fue de hecho observado por primera vez en 1919 por Davisson y Kunsman. Las observaciones fueron refinadas en 1925, buscando contrastar los hechos experimentales con los resultados de la teoría de De Broglie, por Davisson y Germer en una serie de experimentos clásicos. Véase Max Jammer, *op. cit.*, págs.249-252.

57 Conviene señalar que antes del trabajo de Schrödinger, Heisenberg, junto con Bohr y Jordan, había ya desarrollado una teoría de los fenómenos cuánticos por caminos distintos, más abstractos, más algebraicos: la llamada *mecánica matricial*. El mismo Schrödinger habría de demostrar posteriormente la equivalencia entre los resultados a los que conduce su propia teoría ondulatoria y los de la mecánica matricial de Heisenberg. Para una explicación sobre el desarrollo de la teoría matricial véase Max Jammer, *op. cit.*, cap. 5.

completo los viejos mecanismos [los de la física clásica], esto habría sido tolerable, porque el camino hubiese quedado libre para una nueva teoría. Pero tal como resultó, nos encontramos ante el difícil problema de salvar su *alma* [el alma de la física clásica], cuyo aliento podía detectarse palpablemente en este microcosmos, y al mismo tiempo, de persuadirlo, por decir así, a no considerar las condiciones cuánticas como “rudos intrusos”, sino como algo surgido de la naturaleza interna de la propia situación”⁵⁸. La física clásica, en otras palabras, no podía ser una teoría completamente incorrecta puesto que sus leyes se empleaban en el tratamiento de sistemas cuánticos como el átomo de Bohr. Por otra parte las reglas de cuantificación, las condiciones cuánticas como las llama Schrödinger, aparecían como “rudos intrusos” que indudablemente se relacionaban con el fundamento mismo de los fenómenos cuánticos pero que no guardaban conexión alguna con las reglas de la física clásica ni encontraban explicación coherente en el ámbito de la “vieja mecánica cuántica”. El texto que hemos citado insinúa también la propia posición de Schrödinger con relación a la mecánica ondulatoria: esta teoría no debe entenderse como una ruptura fundamental con la mecánica clásica, cuya “alma” debe ser salvada, sino más bien como una extensión de la misma que la comprende como caso límite. No debe extrañar por eso que Schrödinger defienda una interpretación causal de la mecánica cuántica.

Schrödinger reafirma la vía encontrada por de Broglie para salir de las dificultades teóricas que él mismo señala. La clave residió en la posibilidad de presumir, en directa analogía con la relación existente entre la óptica geométrica y la óptica ondulatoria, que el principio de Hamilton, que rige el movimiento de las partículas en la mecánica clásica, es la manifestación de un “mecanismo ondulatorio” que debía encontrarse en la base de la mecánica de los corpúsculos. De esta manera “el recorrido individual de un punto de masa pierde absolutamente su esencial significación física y se convierte en algo ficticio, así como el rayo de luz individual”⁵⁹. Para Schrödinger, el fenómeno ondulatorio parece ser, como en el caso de la óptica, lo esencial. Las trayectorias observables de las partículas no serían sino manifestaciones del carácter ondulatorio del fenómeno que, como los rayos de luz en la óptica geométrica, aparecerían, se harían visibles, bajo determinadas circunstancias.

58 Erwin Schrödinger, “La idea fundamental de la mecánica ondulatoria” (trabajo leído en Estocolmo, el 12 de diciembre de 1933, al aceptar el Premio Nobel) en *¿Qué es una ley de la naturaleza?*, México, Breviarios del Fondo de Cultura Económica, 1975, pág. 123.

59 *Ibid.*, pág. 124.

Esta particular concepción sobre los orígenes de la mecánica ondulatoria, compartida por de Broglie y Schrödinger, lleva a este último autor a una conclusión que puede parecer sorprendente: “La nueva teoría no es, en realidad, una teoría *nueva*, sino que es una completa expansión y desarrollo orgánico, casi podría decirse una re-exposición de la vieja teoría en términos más sutiles”⁶⁰. Pero, ¿cómo es posible entonces que la “nueva teoría” conduzca a resultados tan marcadamente distintos? Schrödinger cree encontrar la respuesta recurriendo nuevamente a la analogía con la óptica y mostrando cómo lo que se hace manifiesto, al tratar con objetos del tamaño del núcleo atómico o de los electrones, son los fenómenos de difracción y de interferencia de las ondas. Más adelante, cuando abordemos algunos de los problemas de interpretación de la mecánica cuántica, tendremos oportunidad de referirnos a las posibles limitaciones de esta posición.

A partir de las ideas de base que hemos expuesto, Schrödinger se propone encontrar la ecuación diferencial que deben obedecer las ondas introducidas por de Broglie. Llegará así, en una serie de artículos clásicos publicados en 1926, a la célebre *ecuación de Schrödinger* que juega un papel análogo, en la teoría cuántica no relativista, al que tiene la segunda ley de Newton en la mecánica clásica. La ecuación diferencial de Schrödinger permite llegar, para sistemas acotados, a la cuantización de la energía si se le imponen a la función de onda ciertas condiciones de frontera. Schrödinger aplicará su ecuación a la resolución del átomo de hidrógeno encontrando para los niveles de energía los mismos resultados a los que había llegado Bohr anteriormente. Abordará además, con esta nueva herramienta teórica, el estudio de varios sistemas cuánticos y desarrollará métodos de aproximación para el estudio de sistemas matemáticamente complejos.

La ecuación de Schrödinger es, como toda ecuación de onda, una ecuación diferencial en las coordenadas y el tiempo. Las derivadas actúan sobre la *función de onda*. Para el caso de un sistema compuesto por una sola partícula esta función depende de las coordenadas y del tiempo. Es una función, como cualquiera de las que representa un movimiento ondulatorio en la física clásica, en el espacio tiempo. Sin embargo, para sistemas conformados por varias partículas la función de onda depende de las coordenadas de cada una de ellas y del tiempo. Ya no representa por lo tanto una perturbación propagándose en el espacio real de tres dimensiones sino en espacios abstractos de configuración. La teoría de Schrödinger propone

60 *Ibid.*

métodos coherentes, que resultaron además muy exitosos, para calcular niveles de energía y funciones de onda de sistemas cuánticos. Abría sin embargo un amplio espectro de interrogantes, referidos sobre todo al contenido físico de las nuevas entidades (funciones de onda) y de los nuevos formalismos. En un primer momento las preguntas más acuciantes se referían sin lugar a dudas al significado físico de la función de onda. ¿Representa la función de onda una perturbación real que se propaga en el espacio? ¿Cómo interpretar, en ese caso, la función de onda de un sistema de más de una partícula? ¿Es la función de onda solamente una entidad matemática que permite calcular cantidades físicas medibles pero desprovista ella misma de realidad física? En ese caso, ¿hasta dónde logra la física cuántica penetrar en la “verdadera” naturaleza de los fenómenos de la microfísica?

C) Algunos problemas de interpretación de la mecánica cuántica

El primer problema de interpretación que presenta la teoría de Schrödinger es, como lo acabamos de señalar, el del significado de la función de onda. De Broglie, en su trabajo inicial, interpretaba las ondas que acompañaban a cada una de las partículas de manera objetiva; tanto la partícula como la onda eran concebidas como realidades físicas aunque no fuese posible establecer aún la naturaleza de las ondas. De Broglie suponía de todas maneras que éstas dirigían y determinaban los movimientos de las partículas. Manteniéndose en esta posición objetivista, incluso después de que la interpretación estadística de la función de onda era ya ampliamente aceptada por los físicos, de Broglie habría de complementar y desarrollar su idea proponiendo un modelo de interpretación causal que se denominó “teoría de la doble solución”⁶¹. Schrödinger propone también una interpretación

61 De Broglie plantea de la siguiente manera uno de los problemas centrales de la interpretación estadística de la mecánica cuántica: “Parece pues que, ya que hemos sido llevados a atribuirle a la onda el carácter de una representación de probabilidad, debemos considerarla como subjetiva. Pero este punto de vista que por una parte parece imponerse levanta por otra considerables dificultades. En efecto es bien difícil negarle todo carácter objetivo a una onda que se propaga en el espacio en el transcurso del tiempo siguiendo ciertas leyes, que se refleja en los espejos, que interfiere y se difracta cuando encuentra obstáculos. ¿Cómo, en los fenómenos de interferencia y difracción, esta onda podría imponerle al corpúsculo posiciones privilegiadas si

objetiva de la función de onda, atribuyéndole el significado de una distribución de electricidad en el espacio real. El electrón, por así decirlo, ya no sería una partícula puntual sino una distribución espacial de carga descrita por la función de onda. Las partículas subatómicas, que se detectan siempre como entidades puntuales, serían grupos de onda, relativamente bien localizados, formados por la superposición de numerosas ondas de distintas frecuencias. Pronto se reconoció sin embargo que esta idea de Schrödinger presentaba serios problemas puesto que las mismas ecuaciones de la mecánica ondulatoria que él había desarrollado determinaban un ensanchamiento rapidísimo de los paquetes de onda. Un electrón relativamente bien localizado se convertiría muy rápidamente en una distribución de carga cubriendo una amplia zona del espacio. Por otra parte el hecho de que para sistemas de varias partículas la función de onda ya no era una función en el espacio real de tres dimensiones introducía complicaciones adicionales a interpretaciones como las de Schrödinger y de Broglie.

En 1926 Max Born propuso una interpretación estadística de la mecánica ondulatoria que recibió rápidamente una gran acogida y que desde entonces ha encontrado una amplia confirmación experimental, llegando a convertirse en la interpretación ortodoxa de la mecánica cuántica⁶². Según esta

ella no existiese sino en nuestro espíritu?" Más adelante de Broglie resume su forma de ver el problema de la siguiente manera: "He aquí el núcleo del problema: como representación de probabilidad es necesario que la onda sea subjetiva y, por el hecho de que ella determina fenómenos físicos, es necesario que sea objetiva [...] En 1926-1927 había entrevisto una solución a este enigma que desde hace algunos años me ha parecido como probablemente la única razonable: habría dos ondas diferentes, una que sería objetiva y representaría una realidad física, lo que le permitiría, al estar íntimamente ligada al corpúsculo, determinar su comportamiento, y la otra que sería una construcción de nuestro espíritu calcada sobre las informaciones que poseemos de la onda objetiva, de manera que nos suministre una representación de las probabilidades relativas al corpúsculo". Ver L. de Broglie, *étude critique des bases de l'interprétation actuelle de la mécanique ondulatoire*, Paris, Gauthier-Villars, 1963.

62 Max Born se refiere a la interpretación de Schrödinger de la siguiente manera: "[...] Schrödinger creía que su teoría ondulatoria hacía posible un retorno a la física clásica determinista; propuso (y lo ha vuelto a hacer recientemente con especial énfasis) abandonar por completo el modelo de partículas y considerar los electrones como una

interpretación, el cuadrado de la magnitud de la función de onda (cantidad siempre positiva) representa la probabilidad de encontrar la partícula, al realizar mediciones para localizarla, en cada punto del espacio y en cada instante. Como la función de onda es la única clave en la teoría de Schrödinger para determinar el estado de las partículas y de los sistemas cuánticos, se concluye que el conocimiento más acabado del estado de un sistema, la función de onda, no permite sin embargo prever sino las *probabilidades* de encontrar la partícula en determinados sitios al realizar mediciones de localización. Algo similar ocurre con cualquier otra medición cuántica: la teoría no permite predecir sino las *probabilidades* de encontrar diversos valores al realizar las correspondientes mediciones. Sin embargo, la mecánica ondulatoria sí permite calcular de manera absolutamente determinista la evolución temporal de esas probabilidades, mientras el sistema no esté perturbado por procesos de medición. En palabras de Born: “El movimiento de las partículas es conforme a las leyes de la probabilidad, pero la probabilidad misma se propaga según la ley de la causalidad”⁶³.

La interpretación estadística de la mecánica cuántica constituye evidentemente un punto de ruptura fundamental con la física clásica. En la mecánica clásica el conocimiento inicial del estado de un sistema (posición y momentum inicial de las partículas que lo conforman) permite con rigurosa exactitud predecir teóricamente la trayectoria y las posiciones y

distribución continua de densidades [...] A la vista de los hechos experimentales esta interpretación nos parecía, al grupo de Gotinga, inaceptable. En aquel tiempo, ya era posible contar las partículas por medio de contadores de centelleo [...]”. Con relación a su propia interpretación estadística de la función de onda Born dice lo siguiente: “De nuevo fue una idea de Einstein la que marcó el camino. Einstein había intentado explicar la dualidad de partículas – los cuantos de luz o fotones– y ondas considerando el cuadrado de la amplitud óptica de onda como densidad de probabilidad de la existencia de fotones. Esta idea podía aplicarse sin más a la función: ψ : $|\psi|^2$, debía representar la densidad de probabilidad de los electrones (u otras partículas). Resultaba fácil afirmar esto, pero, ¿cómo podía demostrarse? Los procesos de colisiones atómicas se prestaban para este propósito...” Ver Max Born, “La interpretación estadística de la mecánica cuántica” (Conferencia pronunciada con motivo de la entrega del Premio Nobel de 1954), en *Ciencia y conciencia en la era atómica*, Madrid, Alianza Editorial, 1971.

63 Citado por Max Jammer, *op. cit.*, pág. 285. Max Jammer explica también cuales fueron las raíces de la interpretación estadística en el pensamiento de Born.

velocidades de los corpúsculos en cualquier instante posterior. De la misma manera la electrodinámica clásica permite en principio predecir la configuración de campos y partículas en cualquier instante si se conoce la configuración inicial. Este determinismo riguroso de la física clásica ya no puede sostenerse en la física cuántica. No es posible predecir en esta teoría trayectorias, posiciones o velocidades bien definidas de las partículas sino tan sólo probabilidades de encontrar tal posición o tal momentum al realizar una medición sobre la partícula.

La interpretación estadística habría de plantear un cúmulo enorme de problemas. Surge, en primer lugar, una pregunta sobre la naturaleza de las probabilidades que se manejan en la física cuántica. Muchos problemas de la física clásica también deben abordarse con ayuda de análisis estadísticos. En particular, la mecánica estadística clásica es una teoría de probabilidades aplicable a sistemas con un gran número de partículas. El empleo de la probabilidad en este caso es sin embargo el reflejo de una *ignorancia subjetiva* sobre los estados iniciales y sobre la evolución de los sistemas. Aunque no cabe duda alguna en la física clásica acerca del carácter estrictamente determinista del movimiento de cada una de las partículas que conforman el sistema, resulta imposible en general seguir el movimiento individual de cada una de ellas y se hace necesario entonces emplear métodos estadísticos para predecir la evolución del sistema en su conjunto. Para Born y sus seguidores, por el contrario, la probabilidad cuántica no es algo meramente subjetivo; no es una simple idea, desprovista de realidad independiente, destinada simplemente a suplir la imposibilidad de un conocimiento de detalle. La probabilidad de la física cuántica posee una realidad objetiva y difiere solamente de los agentes físicos ordinarios en que no transmite energía ni momentum⁶⁴. En consecuencia habría que suponer que, de alguna manera, el comportamiento *objetivo* de los entes cuánticos es estadístico.

La interpretación de la probabilidad cuántica como representación de un comportamiento objetivo de los entes del mundo microfísico se ve reforzada, como lo señaló acertadamente de Broglie (ver nota 61), por el resultado de los experimentos de interferencia y difracción de partículas⁶⁵. Resulta que

64 Véase Max Jammer, *op. cit.*, pág. 286.

65 Richard Feynman ha trabajado en detalle un experimento hipotético que ilustra magistralmente las diferencias entre el comportamiento observable de los entes cuánticos y el de los corpúsculos y las ondas

al hacer pasar un flujo de partículas por una estructura periódica (un cristal, por ejemplo), las partículas se distribuyen estadísticamente según un patrón característico de difracción que puede calcularse haciendo interferir las funciones que describen el estado de las partículas. Si la superposición de las funciones, y la interferencia que de allí resulta, tiene efectos observables sobre el comportamiento del flujo de corpúsculos, es difícil pensar que estas ondas sean tan sólo constructos matemáticos que apenas reflejan una ignorancia subjetiva sobre el estado real de las partículas.

A pesar de su eficacia predictiva, no todos los hombres de ciencia estuvieron de acuerdo con esta interpretación. Posiblemente el caso más notable de desacuerdo, además de los de de Broglie y Schrödinger, es el de Einstein. Para este gran hombre de ciencia la mecánica cuántica, a pesar de sus logros indiscutibles en la explicación y predicción de los fenómenos cuánticos, no podía ser una “teoría completa”. Detrás de la descripción estadística que nos ofrece la teoría, se esconde una realidad que debería poderse aprehender de manera determinista. No puede descartarse, como según Einstein lo hacen algunos dogmáticos de la interpretación ortodoxa, la posibilidad de encontrar una teoría más acabada que pueda dar cuenta de ese determinismo básico del mundo subatómico. “El carácter estadístico de la actual teoría [dice Einstein] debería ser una consecuencia necesaria de la descripción incompleta de los sistemas en la mecánica cuántica, y no debería existir ya ningún piso para la suposición de que una futura base para la física debe fundarse sobre la estadística [...] Yo creo [...] que esta teoría [la mecánica cuántica] no ofrece un punto de partida útil para el desarrollo futuro⁶⁶.”

clásicos. Se trata de hacer pasar un flujo de partículas cuánticas (electrones, por ejemplo) por dos rendijas finas cortadas en una pantalla que bloquea el paso de los electrones. Las partículas que logran pasar se recogen y se cuentan al incidir sobre una pantalla. Feynman muestra como al pasar por las rendijas los electrones se comportan como si fuesen ondas. Sin embargo se detectan en la pantalla como partículas puntuales. Es posible detectar, modificando el experimento, por cuál de las rendijas pasa cada partícula, pero al hacerlo se destruye el patrón de interferencia que se obtenía en la pantalla y por tanto la información sobre el momentum de las partículas. Estas influencias mutuas de las distintas mediciones ilustran además el principio de indeterminación de Heisenberg. Véase R. P. Feynman, *The Feynman Lectures on Physics*, Addison-Wesley, 1965, Volumen 3, cap. 1.

66 Albert Einstein “Autobiographical Notes”, en *Albert Einstein*:

Además de las dos posiciones que hemos señalado con relación al carácter probabilístico de la mecánica cuántica —1. la probabilidad cuántica no es una probabilidad subjetiva sino que refleja el comportamiento básico de una realidad que no puede ya pensarse en términos de un determinismo en el sentido clásico, y 2. la realidad de la microfísica es determinista y la mecánica cuántica, al no reflejar el determinismo de fondo, no es una teoría que pueda considerarse completa— cabe una tercera posición, la que asumen probablemente la mayoría de los hombres de ciencia. Esta postura podría expresarse de la siguiente manera: el formalismo matemático de la mecánica cuántica junto con las reglas interpretativas fundamentales, desarrolladas principalmente por Max Born, nos permiten predecir el desarrollo de los fenómenos cuánticos tal como éstos pueden ser observados en el laboratorio. En otras palabras, existe una muy buena correspondencia entre las mediciones actualmente realizables y las predicciones teóricas. Por eso la teoría cuántica es, por lo menos de momento, satisfactoria. El problema de saber si la descripción cuántica corresponde o no a la realidad de fondo del mundo microfísico es una pregunta que la ciencia no puede responder y que tal vez carece incluso de sentido. Más bien podría decirse que, en su trabajo cotidiano, el hombre de ciencia va conformando un sentido de realidad sobre las entidades cuánticas, mediado por la teoría y por los procedimientos experimentales de laboratorio.

Algunas facetas importantes de la interpretación estadística, relacionadas con los procesos de medición, pueden ser discutidas a partir de las *relaciones de indeterminación de Heisenberg*. Estas relaciones, propuestas por Heisenberg en 1927, pueden ser deducidas del formalismo teórico de Schrödinger. Centraremos nuestra discusión sobre la más conocida de estas relaciones, la relación de indeterminación para la posición y el momentum

Philosopher-Scientist, editado por Paul Arthur Schilpp, Harper and Row, 1959, Vol I, pág. 87. Una idea similar a la de Einstein — detrás de las predicciones probabilísticas debe haber mecanismos estrictamente causales— orienta los numerosos intentos de las así llamadas teorías de “variables ocultas”. La idea detrás de estos intentos es que deben existir variables que no pueden ser observadas pero que permiten una descripción clásica determinista de los fenómenos cuánticos. De alguna manera estas teorías constituyen intentos de reducir la mecánica cuántica a la física clásica. Para una explicación general sobre los supuestos de estas teorías puede consultarse el libro de Bernard d’Espagnat, *Conceptual Foundations of Quantum Mechanics*, W.A. Benjamin, 1971, Cap. 8.

de una partícula, que se escribe matemáticamente como $\Delta x \Delta p \geq h$. Esta relación puede interpretarse de la siguiente manera: en cualquier experimento diseñado para medir la posición y el momentum de una partícula cuántica es imposible medir *ambas cantidades* con absoluta precisión⁶⁷. Siempre habrá alguna indeterminación Δx en la medición de la posición y paralelamente una indeterminación Δp en la medición del momentum. Estas indeterminaciones se relacionan entre sí de tal manera que al aumentar la precisión en la medición de x (y disminuir por lo tanto Δx) la indeterminación de p , Δp , aumenta de modo tal que el producto de Δx y Δp nunca sea menor que la constante h de Planck. Heisenberg ilustra su relación por medio del análisis cuidadoso de varios experimentos de la física cuántica⁶⁸. Probablemente el más conocido de todos ellos es un experimento hipotético en el cual se busca determinar por medio de una lente la posición de un electrón. Para poder observar el electrón, que por simplicidad podemos suponer inicialmente en reposo, es necesario iluminarlo con un rayo de luz, de tal manera que la luz dispersada por el electrón penetre en la lente y forme una imagen del mismo. La luz, sin embargo, al interactuar con el electrón le comunica un impulso a la partícula, la cual adquiere así un momentum. Se puede mostrar, analizando los detalles del proceso de medición, que al afinar la medida de la posición, disminuyendo así Δx , los efectos de la interacción de los fotones con el electrón aumentan, decreciendo el conocimiento que se tenía sobre el momentum del electrón (o sea aumentándose Δp) inmediatamente después de la interacción.

El análisis de los experimentos cuánticos a la luz de las relaciones de indeterminación permite concluir que, como ocurre también en la física clásica, todo proceso de medición implica una interacción con el ente cuántico sobre el cual la medición se realiza. La diferencia crucial con la

67 Vale la pena señalar que esta interpretación de las relaciones de incertidumbre, aunque es la más aceptada entre los físicos, puede ser sometida a discusión. Karl Popper por ejemplo considera incorrecta la interpretación que hemos esbozado, según la cual las relaciones de indeterminación limitan la precisión alcanzable en las medidas sobre una sola partícula. Popper propone interpretar estadísticamente las relaciones de indeterminación, que él propone llamar "relaciones estadísticas de dispersión", de tal manera que éstas se apliquen sólo de manera estadística a conglomerados de partículas. Véase K. Popper, *La lógica de la investigación científica*, Tecnos, 1973. Cap. 9.

68 Véase, W. Heisenberg, *The Physical Principles of the Quantum Theory*, Dover Publications Inc., 1930, Caps. II y V.

física clásica es que, en este último dominio, la teoría permite calcular los efectos de la interacción; en el dominio cuántico, por el contrario, los efectos de la interacción se rigen por las leyes de la probabilidad y no es posible por eso calcular su magnitud o preverla.

Niels Bohr, a propósito de la intensa discusión que se da en 1927 alrededor del problema de la medición suscitado por las relaciones de indeterminación, propone dos tesis tendientes a clarificar la naturaleza de las medidas cuánticas. La primera de ellas señala como “sin importar en qué medida los fenómenos puedan trascender el alcance de las explicaciones de la física clásica, la descripción de todos los resultados de experiencia debe ser expresada en términos clásicos”. Según Bohr la razón para proponer este enunciado es simple: “por la palabra ‘experiencia’ hacemos referencia a una situación en la cual podemos decirle a otros hombres lo que hemos hecho y lo que hemos aprendido; resulta de ahí que la descripción del dispositivo experimental y de los resultados de observación debe ser expresada en un lenguaje desprovisto de ambigüedad, usando convenientemente la terminología de la física clásica”. El lenguaje no ambiguo sería el que se configura sobre la base de la experiencia que nos es directamente accesible, la del mundo macroscópico que describe la física clásica. La primera tesis implica a su vez, según Bohr, la segunda: “la imposibilidad de toda separación nítida entre el comportamiento de los objetos atómicos y su interacción con los instrumentos de medida que sirven para definir las condiciones bajo las cuales el fenómeno se manifiesta”⁶⁹. Como consecuencia, la atribución de cualidades físicas a los entes cuánticos se vuelve problemática; comporta, como dice Bohr, un “elemento de ambigüedad esencial”. El dilema onda-corpúsculo sería un ejemplo de este tipo de ambigüedad que resulta de la inevitable descripción de comportamientos observables experimentalmente en términos de categorías clásicas, como son justamente las de onda y corpúsculo. Resultaría infundado, a partir de la sola evidencia experimental, atribuirle a los entes cuánticos el carácter ya sea de partículas ya sea de ondas o los dos juntos a la vez. Toda atribución directa de propiedades a los entes cuánticos, incluso toda afirmación sobre ellos, debe tomar en cuenta que, explícita o implícitamente la atribución o la afirmación hacen referencia a situaciones experimentales en las cuales el instrumento de medida y lo que por medio de él se observa constituyen un todo

69 Niels Bohr, “Discussion avec Einstein sur des problèmes épistémologiques de la physique atomique”, en *Physique atomique et connaissance humaine*, págs.66, 67.

indisoluble. La posición de Bohr, contraria en este sentido a la de Einstein, cuestiona, casi que por principio, la posibilidad misma de establecer la verdadera constitución de las entidades cuánticas⁷⁰. Todo lo que sobre ellas podemos saber queda condicionado por la insoluble unidad de los objetos observados y los aparatos de medida. Como consecuencia de estas consideraciones Bohr no puede atribuirle un carácter objetivo a las funciones de onda. Considera sin embargo, en controversia nuevamente con Einstein, que la mecánica cuántica es una teoría completa. La naturaleza de la realidad cuántica y las limitaciones que de allí resultan sobre los procesos de medición no permitirían llegar a un conocimiento esencialmente más detallado que el que nos suministra la actual teoría.

Las controversias que hemos intentado presentar sobre la interpretación de la mecánica cuántica replantean, en el contexto particular del trabajo científico del presente siglo, problemas filosóficos de fondo sobre el conocimiento del mundo natural. Las relaciones complejas entre el conocimiento científico y el mundo real, las dificultades para elaborar imágenes coherentes de la realidad atómica que aparentemente desborda las pautas de regularidad y orden afianzadas por siglos de trabajo sobre la base de una experiencia en el mundo macroscópico de la física clásica, las limitaciones del lenguaje para expresar una realidad que sólo de manera indirecta —por las trazas que deja en los aparatos macroscópicos de medición— nos es accesible. Estos son algunos de los problemas acuciantes que la física actual podría plantearle a la filosofía. Aunque por su forma y por el contexto cultural y social en el cual se formulan parecen distintos, tal vez en el fondo se trata de los mismos problemas fundamentales que la naciente ciencia del siglo XVII le planteó a los filósofos de la Ilustración.

70 Bernard d'Espagnat, en su interpretación de la posición de Bohr, va incluso más lejos. Según él Bohr ni siquiera admite la posibilidad de pensar los sistemas cuánticos como poseedores de propiedades individuales independientes de los arreglos experimentales. Véase B. d'Espagnat, *Conceptual Foundations of Quantum Mechanics*, W.A. Benjamin, 1971, Cap. 18.