

PUENTES ENTRE TEORÍAS: PAUL EHRENFEST Y SU LUCHA POR CLARIFICAR LA HIPÓTESIS CUÁNTICA Y SUS CONSECUENCIAS

RICARDO GUZMÁN*
JOSÉ ANTONIO CERVERA**

Resumen: En los orígenes de la física cuántica, a principios del siglo xx, la asimilación y maduración de las nuevas teorías requirió del establecimiento de vínculos con sus antecesoras, antes de poder desprenderse de ellas y formar una nueva estructura totalizadora de comprensión en esta disciplina. En este artículo analizamos el papel que jugó Paul Ehrenfest en una parte de ese proceso. En la primera parte destacamos el paralelismo de sus investigaciones con las de Niels Bohr, mostrando cómo el trabajo conjunto de ambos nos permite argumentar en favor de la continuidad conceptual en el desarrollo de teorías científicas. Sin embargo, también mostramos que dicha continuidad tiene un límite. En nuestro caso de estudio hacemos uso del análisis que Paul Ehrenfest y Albert Einstein hacen del experimento de Stern-Gerlach para mostrar que, en una revolución del conocimiento, al final surgen en verdad nuevos paradigmas con los que finalmente las nuevas teorías se desprenden de las anteriores.

PALABRAS CLAVE: EHRENFEST, BOHR, MECÁNICA CUÁNTICA, PRINCIPIO DE CORRESPONDENCIA, PRINCIPIO ADIABÁTICO

Abstract: *In the origins of quantum physics, in the early 20th century, assimilation and maturity of the new theories required the establishment of linkages with their predecessors, before getting rid of them and being able to form a new all-embracing*

* Instituto Tecnológico de Monterrey, Campus Monterrey, rguzman@itesm.mx

** Instituto Tecnológico de Monterrey, Campus Monterrey, j.a.cervera@itesm.mx

structure of understanding in the discipline. In this paper we analyze the role played by Paul Ehrenfest in a part of that process. In the first part we highlight the parallelism of his work with that of Niels Bohr showing how the combined work of both allows us to argue in support of the conceptual continuity in the development of scientific theories. However, we also show that such continuity has its limits. In our case of study we use the analysis that Albert Einstein and Paul Ehrenfest made of the Stern-Gerlach experiment to show that, in a revolution of knowledge, in the end new paradigms appear with which the new theories finally emerge from the earlier.

KEY WORDS: EHRENFEST, BOHR, QUANTUM MECANIC, PRINCIPLE OF CORRESPONDENCE, ADIABATIC PRINCIPLE

INTRODUCCIÓN

El Primer Congreso Solvay, en 1911, fue la oportunidad para que la comunidad de científicos en el campo de la física reconociera la necesidad de aceptar el cuanto como un nuevo concepto que había llegado para quedarse. En los años posteriores se siguieron acumulando evidencias en favor de la hipótesis cuántica. Paul Ehrenfest (1880-1933) jugó un papel crucial en la búsqueda de significados de esas nuevas ideas, cuestionando el lugar que deberían tener en la física (véase Navarro y Pérez, 2004). A partir de 1911, Ehrenfest fue construyendo el concepto de invariantes adiabáticas como guía para la posible generalización de las ideas cuánticas. Su principio adiabático, junto con el principio de correspondencia de Niels Bohr (1885-1962), se convirtió en una forma de establecer puentes entre la visión mecanicista y electromagnética clásica y los nuevos conceptos. En este artículo, defenderemos la idea, siguiendo parte del trabajo de Ehrenfest y su relación con otros científicos, en particular con Niels Bohr, de que aunque la mecánica cuántica puede entenderse como un cambio de paradigma en la visión física del mundo respecto de la visión clásica, algunos físicos se esforzaron profundamente y lograron, en cierta medida, entender las nuevas teorías como una evolución y generalización natural de las anteriores.

Por supuesto que en el proceso resultó imposible no enfrentarse con elementos, finalmente inconmensurables, no comparables, entre teorías,

que ponían en riesgo la construcción de lazos de unión entre ambas, poniéndose al descubierto las consecuencias que las nuevas teorías imponían en la comprensión de la realidad. Así lo identificaron Paul Ehrenfest y Albert Einstein (1879-1955) a partir de ciertos experimentos cruciales que sirvieron de apoyo para la aceptación de las nuevas teorías. En particular, el experimento de Stern-Gerlach es comentado por ellos y resaltan, entre otros, los serios problemas de interpretación que de ahí surgen y los peligros que los resultados de dichos experimentos representan para el principio de causalidad en física.

EL PRINCIPIO ADIABÁTICO

Paul Ehrenfest fue, junto con Albert Einstein, uno de los pioneros en la investigación de la problemática cuántica. Su interés en torno a los fenómenos de la radiación surgió durante su estancia en Leiden en 1903 escuchando a Hendrik Lorentz. En un artículo publicado en 1911, Ehrenfest evidenció el carácter no sólo suficiente, sino también necesario, de la cuantización de la energía, para poder dar cuenta de las leyes de la radiación.¹ A partir de esos ejercicios de reflexión y de clarificación en torno a la hipótesis cuántica, surgió para Ehrenfest una nueva cuestión a resolver: la posibilidad de generalizar la hipótesis cuántica a otros fenómenos o procesos atómicos, diferentes al oscilador armónico simple. Desde el principio quedó seducido por una paradoja: aunque la teoría cuántica parecía no concordar con las teorías tradicionales, algunos de sus resultados seguían siendo válidos desde la nueva perspectiva (Luntheren, 2003: 14). Ehrenfest tenía la esperanza de que el análisis de estos resultados pudiera brindar una mejor comprensión de los enigmáticos principios cuánticos.

¹ El artículo se titula “¿Qué aspectos de la hipótesis del cuanto de luz juegan un papel esencial en la teoría de la radiación térmica?”. Fue publicado en los *Annalen der Physik*, vol. 36. Se puede consultar en Ehrenfest, 1959: 185-212.

Orígenes del principio adiabático

En ese artículo de 1911, la invariante adiabática E/ν ,² donde E representa energía y ν frecuencia, había jugado un papel muy importante en sus argumentos. En esencia, Ehrenfest había demostrado que la ley de desplazamiento de Wilhelm Wien³ era una expresión particular de la segunda ley de la termodinámica (en el sentido estadístico de Ludwig Boltzmann) para un sistema de osciladores con la invariante E/ν y por lo tanto con una función de peso o función de densidad de probabilidad $\gamma(\nu, E)$ de la forma $G(E/\nu)$. Es decir, la relación de Boltzmann entre la entropía y la cantidad de configuraciones con las que se puede lograr la distribución más probable seguía siendo válida precisamente porque Max Planck había cuantizado la invariante adiabática de los osciladores, es decir, la relación de su energía a su frecuencia. Sólo podía asegurarse la validez de la segunda ley de la termodinámica, si la función de peso estadística dependía sólo de su invariante adiabática (véase Klein, 1985: 279). Así, la ley de Wien que podía derivarse a partir de argumentos clásicos, se sostenía también bajo las condiciones cuánticas con la condición de que se abandonara el principio clásico de distribución uniforme del espacio de fase.⁴ A Ehrenfest le pareció que sería de fundamental importancia generalizar la aplicación de reglas cuánticas y establecer su relación con la mecánica tradicional.

Ehrenfest estaba seguro de que ese análisis que había hecho de la derivación de la ley de Wien podía extenderse a otros sistemas. Lo requeri-

² Una invariante adiabática es una propiedad de un sistema físico que permanece constante cuando el sistema cambia lentamente.

³ En el contexto del fenómeno de la radiación de cuerpo negro, la ley de desplazamiento de Wien establece que el producto $\lambda_m T$ es constante, donde λ_m es la longitud de onda para la cual ocurre el valor máximo en el espectro de radiación y T es la temperatura.

⁴ Tiempo después Ehrenfest se referiría a la renuncia de ese principio clásico al escribir a Bohr que “habíamos perdido, en principio, las bases de la vieja demostración de Boltzmann de la segunda ley, al seguir a Planck en el abandono del supuesto de Boltzmann de que $G \equiv 1$ ” (Ehrenfest a Bohr, 10 de mayo de 1918, citado en Klein, 1985: 283). Ehrenfest se esforzaría por restablecer la armonía a través de las invariantes adiabáticas de las condiciones cuánticas.

do era una generalización apropiada de lo que en su análisis había sido una propiedad peculiar del oscilador armónico, la invariante E/v . En octubre de 1912 realizó, en su libro de notas, una serie de cálculos relacionados con el caso de partículas (moléculas) que se encontraban rebotando entre paredes perfectamente elásticas. Halló que, si las paredes se aproximan entre sí con lentitud (adiabáticamente), entonces la energía cinética de las moléculas aumenta (proveniente del trabajo hecho al aproximar las paredes), y la frecuencia de las colisiones con las paredes también aumenta, de tal manera que, la relación de dicha energía a la frecuencia se mantiene constante (referido en Klein, 1985: 260). Este y otros ejemplos lo llevaron a sentirse seguro de que debía existir una cantidad adiabática invariante para cualquier sistema periódico. La pregunta guía que tendría ahora Ehrenfest sería: si queremos pasar del caso especial de la oscilación armónica a sistemas periódicos generales, ¿qué función análoga a E/v permanecerá constante?

Durante las vacaciones de navidad de 1912, Ehrenfest dio un primer paso en su búsqueda.⁵ Lo que encontró fue, fundamentalmente, que para cualquier sistema periódico, cuya energía depende de ciertos parámetros, la integral en el tiempo de la energía cinética sobre un periodo completo es invariante cuando los parámetros cambian adiabáticamente.⁶ Este teorema, estrictamente hablando, de la mecánica clásica, fue considerado por Ehrenfest como la clave para la generalización de la teoría cuántica.

En mayo de 1913 tuvo lugar una conferencia internacional en Gotinga dedicada a la problemática cuántica. Ehrenfest asistió, pero no como conferencista, de manera que no tuvo oportunidad de explicar con amplitud sus ideas (véase Luntheren, 2003: 15). Sin embargo, otros científicos sí expusieron sus puntos de vista, algunos de los cuales tenían un

⁵ Aunque no publicó lo que descubrió sino hasta casi un año después, sí quedó asentado en una carta a su amigo Abram F. Jöffe fechada el 20 de febrero de 1913. En Klein, 1985: 261-263 se cita de manera extensa.

⁶ Lo que es equivalente a decir que, ante este cambio adiabático, la energía cinética promedio (K) puede aumentar o disminuir, en cuyo caso correspondientemente, la frecuencia de repetición (V) en los movimientos del sistema disminuirá o aumentará, de tal manera que el cociente K/V permanecerá constante.

marcado contraste con el enfoque de Ehrenfest. Curiosamente, Planck, el iniciador de la teoría cuántica, se mantenía aún muy reticente, a pesar de las nuevas evidencias en favor de la misma, y consideraba que aún se podían buscar otras alternativas al uso de la teoría cuántica. Por el contrario, Peter Debye consideró que lo que se había hecho hasta ahora en torno al cuanto era tan sólo el primer escalón en esta nueva dirección (véase Klein, 1985: 273-274). En ese mismo año, Niels Bohr (1913) escribió la primera parte de su trabajo “Sobre la constitución de los átomos y las moléculas”, que se convertiría en uno de los más significativos en teoría cuántica. Sin embargo, la conferencia en Gotinga ocurrió antes y, por lo tanto, ahí no se discutieron sus ideas.

El modelo de Bohr y la reacción de Ehrenfest

De esta manera, en tanto que Ehrenfest se encontraba ocupado tratando de esclarecer la problemática cuántica del momento, el físico danés Niels Bohr desarrollaba ideas mucho más radicales en torno al problema de la estructura interna del átomo. Bohr aplicó la cuantización a la descripción de la energía mecánica de los electrones en un átomo, partiendo del modelo planetario de Ernest Rutherford, el cual por un lado tenía bases experimentales muy sólidas, pero por otro presentaba claras contradicciones con la física clásica.

Más problemática era aún su sugerencia de que la frecuencia de la radiación emitida por un átomo no tenía nada que ver con la frecuencia de movimiento de los electrones. Esta suposición se contraponía tanto con la electrodinámica clásica como con todas las ideas conocidas sobre vibraciones o fenómenos ondulatorios. Según Bohr, la emisión de radiación era consecuencia de los cambios discretos de energía de los electrones al pasar de un estado cuántico a otro, y la frecuencia de la radiación dependía únicamente de la diferencia de energía asociada (véase Gamow, 1985: 29-46).

Este supuesto, aparentemente absurdo, le permitió a Bohr calcular, de manera exitosa, las frecuencias específicas de la radiación emitida por el átomo de hidrógeno, deduciendo la fórmula de Johann Jakob Balmer del espectro de ese elemento. Algunos estudiosos del tema, entre ellos Albert Einstein y Arnold Sommerfeld, tomaron muy en serio la teoría de

Bohr al quedar impresionados por los resultados que se obtenían con ella. En cambio, otros vieron en sus ideas sólo incoherencias sin significado alguno. Paul Ehrenfest pertenecía a los escépticos. En una carta a Hendrik Antoon Lorentz, se lamentaba diciendo que Bohr lo había llevado a la desesperación: “si ésta es la manera de llegar a la meta, debo renunciar a la física” (citado en Klein, 1985: 275).⁷ Ehrenfest no se esforzó, al menos por algunos años, por entender y aceptar el enfoque y las propuestas de Bohr (véase Klein, 1985: 278-279). No fue sino hasta que se conocieron personalmente después de la Primera Guerra Mundial, cuando Ehrenfest se convirtió en amigo cercano y su admirador. Mientras tanto, Bohr le seguiría dando mucha importancia al análisis espectral, como el mejor camino para lograr extender la teoría cuántica, en tanto que Ehrenfest seguiría de momento por su propia ruta.

Después, Sommerfeld trató de averiguar la manera de ajustar algunos datos experimentales inexplicables en el modelo de Bohr. Con este objetivo en mente, introdujo reglas y números cuánticos adicionales. Con sus ajustes pudo ofrecer una explicación exitosa de la separación de las líneas espectrales que ocurría en presencia de un campo eléctrico (efecto Stark) o de un campo magnético (efecto Zeeman) (véase Boeyink, 2005: 29). Bohr, al continuar su trabajo en 1916, tomó en consideración la investigación de Sommerfeld y escribió, a partir de 1918, una serie de artículos concernientes a la teoría cuántica en relación con la estructura atómica (teoría de Bohr-Sommerfeld) titulada *Sobre la teoría cuántica de los espectros de línea*. En su trabajo, Bohr asumía que, hasta cierto punto, la mecánica clásica seguía siendo válida; su descripción del modelo atómico seguía conteniendo los elementos clásicos de momento, energía y posición. Por eso, un principio importante utilizado en esta serie de artículos fue el llamado *principio de correspondencia*, del que nos ocuparemos más adelante y que jugó, junto con la hipótesis adiabática de Ehrenfest, un papel importante como principio guía en las futuras investigaciones que permitirían la transición de la física clásica a la física cuántica.

⁷ Ehrenfest a Lorentz, 25 de agosto de 1913.

Construyendo puentes: Ehrenfest y el principio adiabático⁸

Ehrenfest no publicó de inmediato sus hallazgos de 1912, pues se encontraba en un momento de transición importante en su vida, ya que acababa de reemplazar a Lorentz en su posición de físico teórico en Leiden. Sin embargo, en noviembre de 1913 se encontró listo para publicar algunas de sus ideas y escribió un ensayo titulado “Un teorema mecánico de Boltzmann y su relación con la teoría de los cuantos de energía” (1959: 340-346). Ehrenfest empieza su artículo recordando lo que ya había mostrado anteriormente en el caso de la radiación del cuerpo negro: cuando hay una compresión reversible y adiabática de las paredes del compartimento, la relación E/v aparece como invariante, siendo este resultado fundamental para la derivación de la ley de desplazamiento de Wien, además coincide con el supuesto de Planck ($\epsilon = nh\nu$). A partir de aquí, Ehrenfest se dispone a contestar las preguntas siguientes:

¿Existe una relación adiabática análoga [a la mencionada] si transitamos del caso de un sistema vibrando sinusoidalmente [...] a sistemas más generales? [y, si es así,] ¿cómo se puede aplicar heurísticamente, cuando el supuesto de Planck ($\epsilon = nh\nu$) se extiende a sistemas con vibración no sinusoidal? (Ehrenfest, 1959: 340-346)

Ehrenfest explica que el punto de partida de su análisis será un teorema mecánico de Boltzmann. Ehrenfest menciona enseguida una posible objeción que se podría levantar en contra de su argumento:

[...] no tiene sentido —se puede argüir— combinar una tesis, que se deriva bajo las premisas de las ecuaciones de la mecánica, con la hipótesis antimecánica de los cuantos de energía [y se apresura a explicar que lo mostrado con la ley de Wien nos da] la esperanza de que los resultados que pueden ser derivados de la mecánica

⁸ Aquí daremos un recuento breve de la formulación del principio adiabático, enfocándonos en nuestro argumento de que incluso en situaciones de grandes saltos conceptuales, existe una continuidad de ideas que conecta las teorías previas con las nuevas. Un análisis más detallado sobre el desarrollo de las ideas de Ehrenfest sobre la hipótesis adiabática se puede encontrar en Klein, 1985: 264-292, pero sobre todo en Navarro y Pérez, 2006.

nica y la electrodinámica clásica por la consideración de procesos adiabáticos macroscópicos, continuarán siendo válidos en la mecánica futura de los cuantos de energía. (Ehrenfest, 1959: 341)

Detengámonos un momento para analizar algunas conexiones. Las ideas de Planck se habían ido aplicando poco a poco a situaciones cada vez más diversas. En todos los casos se asumía que la mecánica clásica seguía siendo válida, pero se aplicaban supuestos adicionales en el sentido de que sólo ciertos valores de alguna cantidad física (la energía, por ejemplo) eran permitidos. El truco consistía en tratar de adivinar las reglas de cuantización correctas para la situación bajo estudio, o de encontrar un conjunto general de reglas de cuantización que funcionaran para todas las situaciones. Vemos ahora, en los esfuerzos de Ehrenfest, la expectativa de poder encontrar una conexión necesaria entre la teoría clásica y la futura, utilizando esta forma de razonamiento que más tarde, en 1914, Einstein bautizó como *hipótesis adiabática* (véase Boeyink, 2005: 71).⁹

Desde aquí vemos con Ehrenfest, y también con Bohr, contradicciones con el concepto de inconmensurabilidad que Thomas Kuhn y Paul Feyerabend pusieran de moda en la década de 1960. De acuerdo con Kuhn, en una revolución científica —como sin duda lo es la revolución cuántica— no sólo resulta una teoría nueva, sino que cambia el campo de problemas científicos, los métodos científicos y el aparato conceptual, es decir, todos los ámbitos de la disciplina correspondiente. Según esta visión del cambio científico, el paso de una teoría a otra se da de una manera desconectada, de manera que no es posible encontrar vínculos lógicos entre la vieja teoría y la nueva que la reemplaza. Un cambio de paradigma, o revolución científica, para Kuhn, es un cambio radical en la forma de ver el mundo (véase Kuhn, 2002).¹⁰ Pero vemos que esto no

⁹ Es interesante recordar cómo el mismo Einstein, mucho tiempo después, confesaba que “a pesar de que hoy sabemos que la mecánica clásica falla como fundamento que domine toda la física, aún ocupa el centro de toda nuestra forma de pensar en física” (Einstein, 1954: 300).

¹⁰ Los planteamientos de Feyerabend en torno al concepto de inconmensurabilidad son parecidos aunque más radicales: véase el capítulo 17 en Feyerabend, 1997.

parece corresponder con un intrincado proceso como lo fue el surgimiento de la teoría cuántica, donde toda idea nueva aparece *pegada* a las viejas y se desprende, si no a través de una lógica transparente, sí al menos a través de un esfuerzo racional que busca llegar a nuevas formas de comprensión que sean compatibles con nuevos resultados experimentales (véase Szumilewics, 1977). Consideramos que eso aparece ejemplificado en procesos de pensamiento como los de Ehrenfest.

Regresando a nuestra historia (nos habíamos referido al artículo de Ehrenfest de 1913), en 1914 estalló el conflicto que mantendría a Europa sumida en la guerra por más de cuatro años y que limitaría las actividades científicas.¹¹ Para Ehrenfest significó perder el contacto con sus colegas rusos y con su amigo cercano Einstein, quien sólo visitó Leiden una vez durante el conflicto armado, en el otoño de 1916. El inicio de la guerra causó gran impacto en la percepción que Ehrenfest tenía del mundo civilizado. Lo que más le afectó, siendo él un individuo despojado de todo nacionalismo, fue el manifiesto chauvinismo de sus colegas científicos más educados y cultos de las naciones en conflicto, algunos de los cuales adoptaron la retórica de la guerra de sus líderes políticos (véase Lunteren, 2003: 16). Ehrenfest se enteró, por ejemplo, de que Ernst Haeckel —un famoso biólogo alemán— había rechazado su grado honorario académico inglés “como si fuera una condecoración militar”, lo cual para Ehrenfest constituía una “acción [...] completamente irracional y perversa” (Klein, 1985: 299),¹² y temía que los físicos estudiosos de la mecánica estadística en los países en conflicto quemaran ceremoniosamente los escritos de Boltzmann y Maxwell respectivamente.¹³

¹¹ En realidad el desarrollo científico no se detuvo del todo, pero sí dificultó la comunicación entre científicos. Basta recordar que en esos años salió a la luz la Teoría General de la Relatividad de Einstein y que también siguieron los desarrollos en Teoría Atómica. Véase por ejemplo Becker, 1987.

¹² Carta de Ehrenfest a Lorentz, el 4 de septiembre de 1914.

¹³ En este contexto también es pertinente recordar el conocido *Manifiesto al mundo civilizado* que salió a la luz en octubre de 1914, firmado por noventa y tres líderes intelectuales alemanes (entre ellos Planck), como respuesta a las críticas internacionales tras la invasión

En este contexto histórico, algunos años después del citado artículo de 1913 y tras haber esperado por algún tiempo la reacción de sus colegas físicos, y ante la tensión de la guerra, Ehrenfest se convenció de que era momento de poner sus ideas en claro y de manera más general. En junio de 1916, Ehrenfest escribió el artículo titulado “Sobre los cambios adiabáticos de un sistema en conexión con la teoría cuántica” (véase Ehrenfest, 1959: 378-399). Tuvo cuidado de dejar claros los propósitos de su investigación:

En un creciente número de problemas físicos los fundamentos de la mecánica (y la electrodinámica) clásica se han usado junto con la hipótesis cuántica, que se encuentra en contradicción con ellos. Resulta deseable, por supuesto, llegar a algún punto de vista general desde el cual se pueda discernir el límite entre las regiones “clásica” y “cuántica”. (Ehrenfest, 1959: 378)

Ehrenfest había venido usando la palabra *adiabático* en analogía con la compresión de gases adiabática usada en termodinámica. En su versión de transformación adiabática, Ehrenfest se refería a los cambios infinitamente lentos en el valor de parámetros o variables del sistema, por ejemplo, el cambio en el valor de un campo eléctrico o magnético. El principio adiabático lo expresa Ehrenfest de la siguiente manera: “si un sistema es expuesto a influencias adiabáticas, entonces los movimientos *permitidos* se transforman en otros movimientos *permitidos*” (Ehrenfest, 1959: 379). Durante este proceso de cambio, las invariantes adiabáticas permanecían constantes. Para movimientos armónicos simples (sinusoidales), Ehrenfest identificaba la invariante como E/v , en tanto que para movimientos periódicos más generales la invariante era $2T/v$, donde E representa la energía total, T la energía cinética promedio y v la frecuencia de repetición del sistema periódico. En casos específicos, como por ejemplo, en la ley de radiación de Planck, estos invariantes producirían un múltiplo entero de la constante de Planck. Pero en el átomo relativista de hidrógeno, no resultaba muy claro cuál era el invariante.

de Alemania a Bélgica (país neutral), donde se afirmaba que la cultura y el militarismo alemán eran inseparables.

Ehrenfest expresaba que era necesario investigar más al respecto (véase Boeyink, 2005: 71).

Por ello Sommerfeld, interesado en los efectos relativistas, no quedó muy impresionado por el artículo de Ehrenfest; esperaba algo más útil en términos de herramientas de cálculo. Sommerfeld le expresó su desencanto en una carta a Ehrenfest (citada en Klein, 1985: 291)¹⁴ y lamentó que Walter Ritz, dada su rica imaginación y capacidad inventiva, hubiera muerto a tan temprana edad y que no hubiera tenido oportunidad de participar en los nuevos desarrollos que tenían lugar en la física. El biógrafo de Ehrenfest, Martin Klein, opina que dicha carta debió ser un golpe terrible para Ehrenfest, dadas la sensibilidad e inseguridad que lo caracterizaban. Los dos años siguientes, Ehrenfest se mantuvo al margen de la teoría cuántica, hasta que el trabajo de Bohr volvió a despertar su interés.

BOHR Y EL PRINCIPIO DE CORRESPONDENCIA

Con la teoría atómica de Bohr-Sommerfeld se podía visualizar al átomo como un sistema mecánico constituido por electrones girando en torno a un núcleo cargado positivamente. Dicho modelo permitió organizar y explicar la diversidad de datos espectroscópicos que se habían acumulado durante el último siglo. Sin embargo, como se ha mencionado, en dicho modelo surgían ciertas dificultades debido a la combinación de conceptos clásicos y de las nuevas ideas cuánticas. Algunos principios fundamentales, como lo fueron el principio de correspondencia de Bohr y el principio adiabático de Ehrenfest, actuaron a manera de estrategias heurísticas en un intento de minimizar dichas dificultades. Tanto Bohr como Ehrenfest comprendieron el valor del trabajo realizado por el otro y cultivaron una amistad que dio frutos importantes para las ciencias físicas.

¹⁴ Sommerfeld a Ehrenfest, 16 de noviembre de 1916.

El principio de correspondencia

Se ha escrito mucho sobre el principio de correspondencia de Bohr, tanto en sus vertientes históricas como filosóficas.¹⁵ En este espacio nos referiremos sólo a algunos puntos esenciales que nos permitan introducirnos en la relación que se dio entre este importante físico y Ehrenfest.

En sus primeros escritos en torno al modelo atómico, Bohr ya había utilizado algunas ideas que pueden asociarse con lo que después se conoció como *principio de correspondencia*, pero fue en la revisión general que hizo de sus ideas en 1916 donde dicho principio se convirtió en una verdadera herramienta poderosa para dilucidar nuevos modelos. Como ya se mencionó, dicha revisión dio por resultado un ensayo titulado *On the Quantum Theory of Line Spectra*, el cual apareció dividido en tres partes. En la parte I,¹⁶ que apareció en abril de 1918, Bohr presenta una introducción general y en ella ofrece un reconocimiento especial a Einstein y a Ehrenfest por su contribución a la teoría cuántica. Se refiere en particular al *principio adiabático* de Ehrenfest llamándolo *principio de transformación mecánica*, expresando que es “de gran importancia en la discusión de las condiciones que se usan para fijar los estados estacionarios de un sistema atómico” (Waerden, 1968: 102). La parte II, publicada en noviembre del mismo año, desarrolla el caso del átomo de hidrógeno, pero incluyendo ahora su estructura fina y su comportamiento bajo el efecto de campos eléctricos y magnéticos. También desarrolla una *teoría de perturbaciones*, basándose en el principio de Ehrenfest (véase Pais, 1991: 193) que describe lo que pasa si las fuerzas en el interior del átomo se modifican por medio de pequeñas fuerzas externas. En la última parte, que se publicó en 1922, Bohr se ocupó del espectro de otros elementos.

¹⁵ La idea fundamental detrás del principio de correspondencia es que si bien la física clásica no puede explicar el comportamiento de la materia a nivel atómico, de todas maneras es fundamental establecer vínculos entre la física clásica y la cuántica. Dicho principio manifiesta la idea de que la física clásica, aunque limitada en sus alcances, resulta indispensable para comprender la cuántica. Véanse Darrigol, 1992: 123-127; Pais, 1991: 192-196; Whitaker, 1996: 121-123; Waerden, 1968: 5-8; Radder, 1991: 203-208, entre otros.

¹⁶ Se puede consultar en inglés en Waerden, 1968: 95-137.

En las tres partes de dicho ensayo, Bohr utiliza como principal herramienta el principio de correspondencia. Su punto de partida son los dos mismos enunciados que había utilizado con anterioridad: que en un sistema atómico sólo pueden existir estados estacionarios discontinuos y que la radiación absorbida o emitida durante una transición entre dos de esos estados posee una frecuencia ν dada por $\Delta E = h\nu$ donde ΔE es la diferencia de energía entre los dos estados. Como estos supuestos indican que no existe emisión de radiación en los estados estacionarios, se sigue que las leyes ordinarias de la electrodinámica ya no son válidas. Sin embargo, Bohr asume que una buena aproximación al movimiento de las partículas en los estados estacionarios se puede obtener a partir de las reglas clásicas, aplicando la ley de Coulomb y calculando los movimientos de dichas partículas (electrones) por medio de la mecánica ordinaria. Bohr hace recordar también que en los estudios de la radiación del cuerpo negro, la región de frecuencias bajas puede explicarse por medio de la electrodinámica ordinaria. A partir de estas ideas, sugiere que la teoría que describa estos fenómenos y concuerde con los experimentos tendrá que ser una generalización natural de la teoría clásica de la radiación. En estas ideas se encuentra el germen del principio de correspondencia en el sentido de una expectativa de identificar una conexión necesaria entre la teoría clásica y la futura teoría esperada, conexión que Bohr identificó con el caso de la aplicación de números cuánticos grandes.

Adicionalmente al número cuántico n introducido por Bohr para representar los niveles discretos de energía, Sommerfeld había incluido otros dos: el número l que representaría diferentes elongaciones de la órbita y el número m_l que definiría su orientación. Un estado cuántico está definido por el conjunto de números cuánticos. El asunto es que, según revelaban los experimentos, no cualquier par de estados puede estar conectado por una transición (por ejemplo, el número cuántico l sólo puede cambiar por una unidad). Parte del trabajo de los físicos en esta área había sido descubrir las *reglas de selección* que establecen qué transiciones son válidas y cuáles no en diferentes situaciones: presencia de un campo eléctrico, presencia de un campo magnético, entre otros. Bohr se abocó a descubrir cómo derivar dichas reglas de selección, y lo hizo con su principio de correspondencia.

El principio se basó en la idea de un límite clásico, como ocurría con la ley de radiación del cuerpo negro. Para el átomo de hidrógeno, Bohr se dio cuenta de que los niveles de energía se acercaban más entre sí conforme n se hacía más grande, lo cual interpretó en el sentido de que la región de valores grandes de n constituía un límite clásico.

El ejemplo más claro es el que compara la frecuencia de rotación f_r de un electrón en una de sus órbitas con la frecuencia de la radiación ν que ocurre en una transición. Desde el punto de vista clásico, se esperaba que el sistema radiara energía electromagnética a la frecuencia f_r . Dados los postulados establecidos por Bohr, no existe tal conexión, pues la frecuencia de la radiación depende sólo de la diferencia de energía y , por lo tanto, está relacionada con dos órbitas, no con una sola. Pero para valores grandes de n , las frecuencias de la radiación para las transiciones entre estados con números cuánticos $n - 1$ y n , o n y $n + 1$ son parecidas entre sí y cercanas al valor f_r que se esperaba clásicamente en cualquiera de esas tres orbitas (n , $n - 1$ y $n + 1$). Además, para una transición de un valor grande de n a un valor de $n + 2$, dicha frecuencia se duplica, lo que representa la posible presencia de una frecuencia fundamental y sus armónicas (múltiplos de la fundamental) como se esperaba que ocurriera de acuerdo con las teorías clásicas. Justo aquí surge la conexión entre las regiones clásica y cuántica, y lo que hizo Bohr para convertir esto en una guía para descubrir las *reglas de selección* fue invertir el proceso: analizar la radiación clásicamente, determinar qué frecuencias deberían estar presentes y traducir esto último a términos cuánticos para de ahí deducir qué *reglas de selección* permitirían esas frecuencias. Aunque todo esto se podía asegurar sólo para el caso de valores grandes de los números cuánticos, Bohr se arriesgó a predecir que dichas reglas seguirían siendo válidas para transiciones entre estados con valores pequeños de los números cuánticos. Con esta herramienta, Bohr pudo incorporar en su teoría no sólo las frecuencias, sino también las intensidades y las polarizaciones de las líneas espectrales. La teoría quizá no ofrecía una imagen lógica y coherente del modelo atómico, pero sí adquirió una gran capacidad de predicción. Al menos así lo pensaba Sommerfeld, quien describió el principio como *una varita mágica* (véase Whitaker, 1996: 123) y considerando los éxitos obtenidos con ella llegó a admitir que la cuestión respecto a que los métodos de Bohr, con su prin-

cipio de correspondencia, fueran o no satisfactoriamente lógicos, era, después de todo, una cuestión secundaria.¹⁷

Estas explicaciones nos permiten enfatizar de nuevo que en estos procesos de descubrimiento, lejos de rechazarse las viejas teorías, se dan esfuerzos sumamente consistentes por mantener una conexión lógica, una continuidad de ideas que permitan abrazar los nuevos conceptos, de tal manera que las teorías confirmadas empíricamente no desaparecen o se tiran al basurero como falsas cuando aparecen otras teorías más nuevas, más universales, sino que conservan su importancia como caso límite de las nuevas teorías. Sin embargo, es indudable que la correspondencia entre teorías tiene sus límites y pueden establecerse diferentes niveles de la misma.¹⁸ En todo caso, se trata de una correspondencia de carácter matemático-formal y desde luego empírica, pero que se puede aplicar sólo a ciertas partes de las teorías involucradas y más difícilmente a su naturaleza teórico-conceptual.

La enseñanza que deja este análisis de la ciencia en su proceso de construcción es, por un lado, que el desarrollo de nuevo conocimiento no es un proceso que se pueda llevar a cabo con métodos de carácter totalmente algorítmico, es decir, que no hay reglas válidas universales, las cuales permitan generar nuevo conocimiento y, por otro lado, que en la práctica de la ciencia se pueden usar con éxito reglas heurísticas para guiar la búsqueda de ese nuevo conocimiento, reglas que sugieran direcciones generales en ese proceso de exploración. Así lo hizo Bohr, tomando en serio la cuestión de la relación entre las viejas y las nuevas

¹⁷ Aquí vemos que Sommerfeld adopta una actitud claramente instrumentalista. La teoría cuántica supuso un gran reto para el debate entre el realismo y el instrumentalismo en la física. ¿Las teorías describían la realidad, o sólo los fenómenos, dejando la *realidad* en la oscuridad? Al final, se impondría entre los físicos la interpretación de Copenhague y el instrumentalismo.

¹⁸ Hans Radder (1991: 203-208) considera tres fases sucesivas de la aplicación del principio de correspondencia en el desarrollo de la mecánica cuántica: correspondencia o acuerdo numérico, continuidad conceptual y correspondencia formal. Peter Szegedi (1999: 147-149), por su parte, considera cuatro niveles de análisis del principio de correspondencia: el nivel experimental, el nivel de las ecuaciones o fórmulas matemáticas, el nivel de los modelos matemáticos abstractos y el nivel de los conceptos teóricos.

ideas teóricas, convencido de que la física clásica, aunque limitada en sus alcances, era indispensable para la comprensión de la nueva física que estaba surgiendo. Y asimismo lo hizo Ehrenfest, siguiendo otros caminos que dependieron más de una profunda visión crítica sobre la naturaleza de las teorías existentes, que de una imaginación creativa y original del tipo que generan estructuras teóricas radicalmente nuevas, pero contribuyendo con ello al crecimiento de su disciplina con bases firmes.

Bohr y Ehrenfest

Llama la atención el tiempo que tuvo que transcurrir para que Bohr y Ehrenfest se conocieran. Ya comentamos cómo Ehrenfest había recibido con actitud escéptica los trabajos de Bohr de 1913, sentimiento que prevaleció durante varios años, pues incluso ya en mayo de 1916, en una carta a Sommerfeld, hizo referencia al “monstruoso modelo de Bohr” (citado en Boeyink, 2005: 28). Sin embargo, esta actitud hostil desaparecería totalmente con el tiempo, tanto en el plano personal como científico.

En una conferencia pronunciada por Ehrenfest en abril de 1917 titulada “El modelo atómico de Rutherford-Bohr”, se refirió a “los resultados importantes que ha conseguido Bohr aplicando la teoría cuántica a la hipótesis atómica de Rutherford” (citado en Boeyink, 2005: 30). Pero, como era costumbre en Ehrenfest, agregó de inmediato preguntas críticas: ¿por qué sólo existen estos movimientos permitidos?, y ¿cómo transmiten luz los electrones? Enseguida, con la claridad que le caracterizaba, respondió a la primera pregunta a la vez que introducía su principio adiabático en relación con los extraños paquetes de energía ε que sólo podían adoptar valores $nh\nu$. Respecto a la segunda pregunta, Ehrenfest señalaba que Bohr utilizaba supuestos incomprensibles, pues la electrodinámica tradicional contestaría que la radiación surge de la aceleración de los electrones. Sin embargo, de acuerdo con Bohr, los electrones no radian energía durante su movimiento orbital en los estados estacionarios.

Ehrenfest empezó a reconciliarse con los métodos empleados por Bohr al percatarse de las importantes extensiones de Sommerfeld a la teoría, pero no mostró una posición más entusiasta respecto a Bohr hasta que

empezó a tener contacto directo con él. La iniciativa en realidad la tomó Bohr al enviar una carta a Ehrenfest el 5 de mayo de 1918. En ella, Bohr enfatizaba el aprecio que tenía por el principio adiabático y explicaba el papel que jugaba en su propio trabajo relativo a la teoría cuántica generalizada de las líneas de radiación espectral. Ehrenfest contestó casi de inmediato, expresando lo contento que se sentía por lo que Bohr había escrito. Por primera vez su principio adiabático lograba atraer la atención de un físico importante. En esa carta Ehrenfest aclaraba que la palabra *adiabático* no debía ser tomada en su sentido termodinámico. Después de algunas otras consideraciones sobre el principio adiabático, Ehrenfest le hacía saber a Bohr que había oído hablar mucho de él y que tenía la esperanza de recibirlo en alguna ocasión en su casa, y terminaba expresando el deseo de que en dicha reunión pudieran contar también con la presencia de Einstein (citado en Boeyink, 2005: 30-31).¹⁹ Tendrían que pasar siete años para que los tres se reunieran; a partir de entonces, Ehrenfest se convirtió en mediador y crítico de las famosas controversias entre Einstein y Bohr.

En la primavera de 1919, Bohr visitó por primera vez Leiden atendiendo la invitación de Ehrenfest a participar en un congreso,²⁰ lo cual se convirtió en el principio de una fuerte amistad. La actitud de Ehrenfest respecto al trabajo y las ideas de Bohr cambió radicalmente. Resultó ahora claro para Ehrenfest que el trabajo de Bohr se dirigía en verdad a la búsqueda de una teoría coherente y se gestó una mayor empatía con Bohr y sus ideas al percibir en él un método de trabajo más intuitivo que matemático, además, tanto su principio adiabático como el principio de correspondencia de Bohr buscaban una conexión entre los principios cuánticos y las teorías clásicas. Después, Ehrenfest quedó por completo seducido por la personalidad de Bohr y por sus concepciones físicas (véase Luntheren, 2003: 17-18). Para Bohr el encuentro también fue muy satisfactorio y de gran enriquecimiento intelectual, como se refleja en una carta que le envió poco después de su visita:

¹⁹ Ehrenfest a Bohr, 10 de mayo de 1918.

²⁰ El nombre de su conferencia fue “Problemas del átomo y la molécula”. También estuvo presente en esa ocasión en la defensa de la tesis doctoral de Hendrik Kramers, discípulo de Ehrenfest (Pais, 1991: 190).

Estoy aquí sentado y pensando acerca de todo lo que me has dicho sobre tal diversidad de cosas y, pensando en cualquiera de ellas, siento que he aprendido tanto de ti que será de gran importancia para mí; pero, al mismo tiempo, me resulta muy difícil expresar mi sentimiento de felicidad por tu amistad, y de gratitud por la confianza y la simpatía que me has mostrado. Me encuentro completamente incapaz de encontrar palabras para ello. (Citado en Klein, 1981: 8)²¹

A finales de 1920, Bohr se encontraba preparando su contribución en el Congreso Solvay que tendría lugar en 1921. No pudo asistir por exceso de trabajo²² y porque se encontraba un poco enfermo. Ehrenfest le ofreció su ayuda y presentó tanto la contribución de Bohr como la suya sobre el principio de correspondencia.²³ El éxito de Ehrenfest en dicha conferencia se refleja en una carta de Lorentz (quien actuó como presidente del Congreso) a Bohr en la que le informa que:

El profesor Ehrenfest hizo todo lo que estuvo a su alcance para salvar su ausencia y la exposición que nos ofreció sobre el principio de correspondencia tuvo un gran éxito. Todos los presentes lo admiramos y estoy seguro de que si usted lo hubiera escuchado, le habría dado mucha satisfacción. (Citado en Boeyink, 2005: 33)²⁴

Ehrenfest visitó a Bohr por primera vez en Copenhague en diciembre de 1921 y la experiencia fue tan rica como en su encuentro en Leiden. Lo que resultaba más atractivo para Ehrenfest respecto de Bohr era su “convicción de que nos encontramos tocando el inicio de una física esencial-

²¹ Bohr a Ehrenfest, 10 de mayo de 1919.

²² En marzo de 1921 se iba a inaugurar su propio Instituto de Física Teórica en Copenhague y estuvo muy ocupado con los problemas organizacionales para el establecimiento del mismo.

²³ La colaboración de Ehrenfest en el Congreso Solvay de 1921 se tituló “El principio de correspondencia, átomos y electrones”. Se encuentra también en Ehrenfest, 1959: 436-442, con el nombre de “El principio de correspondencia”.

²⁴ Lorentz a Bohr, 20 de mayo de 1921. Para mayor detalle sobre las vicisitudes ocurridas en relación con la participación de Bohr y la ayuda que le brindó Ehrenfest, se puede consultar Klein, 1981: 8-9.

mente nueva” (citado en Klein, 1981: 10)²⁵ y su manera de trabajar y escribir que contrastaba con la de su otro gran amigo, Albert Einstein. En una conversación con Robert Oppenheimer, Ehrenfest comparó a sus dos amigos y marcó sus diferencias comparándolos con dos grandes pintores: “Einstein es como Holbein, en el que todo, dentro del marco, es luminosamente claro y armonioso. Con Bohr, es como con Rembrandt, hay una región intensa de luz, cuya intensidad es realzada por la oscuridad que la rodea” (citado en Boeyink, 2005: 37). Sería interesante saber con qué pintor se identificaría él mismo siendo que su forma de escribir se caracterizó por el uso de oraciones cortas pero certeras, resaltando o incluso caricaturizando alguna situación para capturar la esencia, los elementos definitorios de un tema o un concepto, en unos cuantos trazos.

De esta manera, Ehrenfest terminó apreciando en gran medida el trabajo de Bohr. En una carta a Lorentz se expresa de él diciendo que es “un científico natural muy completo” (citado en Boeyink, 2005: 72).²⁶ También terminó sintiéndose muy orgulloso por la incorporación que Bohr hizo de su hipótesis adiabática. En 1923 escribió un artículo titulado “Transformaciones adiabáticas en la teoría cuántica y el tratamiento que de ellas hace Niels Bohr” (Ehrenfest, 1959: 463-470), donde dice lo siguiente:

Se presenta aquí, para su discusión [...] el ‘Principio Adiabático’ que en manos de Bohr se ha convertido en un maravilloso y agudo instrumento, de lo que me siento asombrado de cómo se ha hecho; porque probablemente no hay, provisionalmente, según creo, discusión más profunda y al mismo tiempo más sucinta del Principio Adiabático, que la que ofrece el mismo Bohr, al mismo tiempo que busca con claridad las relaciones orgánicas entre el Principio Adiabático y el Principio de Correspondencia [...] puedo intentar mostrar [...] qué elementos esclarecedores y de profundización, y qué nuevas perspectivas le debemos a la intervención de Bohr. (Ehrenfest, 1959: 463)

La colaboración Bohr-Ehrenfest estuvo encaminada primordialmente a esta búsqueda de conexiones entre las viejas teorías y las nuevas ideas

²⁵ Ehrenfest a Lorentz, 4 de febrero de 1922.

²⁶ Ehrenfest a Lorentz, 4 de febrero de 1922.

cuánticas, pero precisamente en esos puntos de contacto surgían las paradojas. ¿Qué pasa cuando se rompe la conexión? Ya en su presentación sobre el principio de correspondencia en el Congreso Solvay de 1921, Ehrenfest expresaba que en el caso general

[...] este puente de interpolación de movimientos intermedios, del que nos hemos servido, oponiendo a una cierta transición la radiación clásica correspondiente, no existe en absoluto. ¿Qué hacer entonces? ¿La idea fundamental de la “correspondencia” implica que en este caso la transición $M' \rightarrow M$ se lleva a cabo por medio de una radiación espontánea? Esto sería una nueva fuente de reglas que limitaría la selección de las vías por las cuales un átomo puede reconstituirse después de una perturbación. (Ehrenfest, 1959: 441)

Dicha forma de radiación rompería con el principio fundamental de causalidad y sería revelado de manera más contundente por algunos experimentos.

EL EXPERIMENTO DE STERN Y GERLACH COMENTADO POR EINSTEIN Y EHRENFEST Y LA AMENAZA A LA CAUSALIDAD

El desarrollo de una ciencia se adhiere necesariamente a ciertos principios lógicos y, en la física, el principio de causalidad ha sido ciertamente uno de ellos. En su forma más simple, dicho principio se refiere a que todo efecto tiene una causa, un antecedente inmediato. El que un evento no tenga una causa que lo haga suceder sería el equivalente a algo *mágico* o *milagroso*. Casi por definición podríamos decir que la función de la física es conocer las causas de los fenómenos. Entonces, ¿podría la física renunciar al principio de causalidad? Con la nueva física, tal parece que sí. Paul Forman (1984) sostiene una tesis en la que argumenta que en la república de Weimar existió un movimiento entre los físicos tendiente a evadir la causalidad en física, atribuyéndolo a influencias culturales externas. Sin embargo, otros filósofos de la ciencia, como es el caso de John Hendry (1980), consideran más bien la existencia de razones internas a la misma disciplina para dar cuenta del abandono de la causalidad estricta en física.

Los principios cuánticos desde luego pusieron en aprietos a los físicos. A pesar de que se hablara de radiación espontánea, sin causa aparente, en general se suponía que existía algún mecanismo causal desconocido en el proceso. Pero el tema ciertamente estaba en el aire. Por otro lado, *espontáneo* no tendría que ser sinónimo de acausal. Bohr prefirió definirlo como un proceso en el cual no se identifica una estimulación externa, pero dejando abierta la existencia de causas internas o todavía desconocidas (Hendry, 1980: 320, n. 50).

Einstein introdujo, en un par de artículos publicados en 1916 y 1917,²⁷ la noción de que las transiciones entre estados en el átomo de Bohr están gobernadas por una serie de probabilidades, de manera análoga a como ocurría en los procesos radiactivos.²⁸ Y nuevamente, aunque Einstein asumía la existencia de algún mecanismo causal detrás de dichas probabilidades, la ausencia explícita de dicho mecanismo resultaba muy provocativa.²⁹ Algunos años después, Einstein mostraba su perplejidad en una carta escrita a Max Born:

²⁷ Una descripción más detallada de las ideas que desarrolló Einstein a este respecto se puede consultar por ejemplo en Pais, 1991: 190-192; en Whitaker, 1996: 120-121 o en Mehra y Rechenberg, 1982: vol. I, 238-243. El artículo completo de Einstein de 1917, titulado “Sobre la teoría cuántica de la radiación”, se puede consultar traducido al inglés en Waerden, 1968: 63-77.

²⁸ La preocupación original de Einstein era obtener una demostración más clara de la ley de radiación de Planck. El 11 de agosto de 1916 había escrito a su amigo Michele Besso diciéndole: “he tenido un destello de lucidez a propósito de la absorción y la emisión de radiación [...] una demostración completamente sorprendente de la fórmula de Planck, yo incluso diría *la* demostración. Todo completamente cuántico” y refiriéndose al mismo trabajo continúa en otra carta el 24 de agosto diciendo: “se puede mostrar de forma convincente que los procesos elementales de la emisión y la absorción son procesos dirigidos” (Einstein, 1994: 129 y 131). Al decir *dirigidos* se refiere a que la radiación emitida no se da en forma de ondas esféricas, sino como paquetes de energía que se proyectan al azar en alguna dirección.

²⁹ Aunque, al trabajar con probabilidades, se puede decir que se trataba de una teoría de carácter estadístico, la situación era muy diferente al caso, por ejemplo, de la mecánica estadística, donde las probabilidades se derivaban de un comportamiento causal de un número muy grande de partículas.

Ese asunto de la causalidad me sigue dando problemas [...] ¿Se podrán llegar a entender la emisión y absorción cuántica de luz en un sentido causal completo, o permanecerá como un elemento estadístico? [...] Me haría muy infeliz renunciar a la causalidad completa. (Citada en Pais, 1991: 191-192)³⁰

En 1922, los físicos alemanes Otto Stern y Walter Gerlach llevaron a cabo un experimento sobre deflexión de partículas que ayudó a sentar las bases experimentales de la mecánica cuántica y que produjo diversas reacciones entre la comunidad científica.³¹ Particularmente, Einstein y Ehrenfest escribieron en el mismo año un artículo titulado “Anotaciones teórico-cuánticas sobre el experimento de Stern y Gerlach”³² que nos parece muy significativo porque muestra la perplejidad de la comunidad científica ante los resultados que arrojaba el experimento. Einstein y Ehrenfest empiezan su comentario en la sección 1 de su artículo diciendo:

³⁰ Carta de Einstein a Bohr, 27 de enero de 1920.

³¹ En el átomo de Bohr, no sólo la energía está cuantizada, sino también el momento angular del electrón. Uno de los números cuánticos empleado en la descripción cuántica de ese sistema determina la orientación de dicho momento angular y es a lo que se le llamó *cuantización espacial*. La energía y, por lo tanto, el espectro del átomo, es independiente de ese número cuántico, por lo que el papel de dicha cuantización espacial resultaba inobservable a través de la espectrografía. El experimento de Stern-Gerlach fue diseñado para determinar si las partículas atómicas poseen en realidad dicho momento angular intrínseco. El experimento consistió en la deflexión de un haz de átomos de plata que atraviesan por un campo magnético no homogéneo. Si las partículas que atraviesan fueran *clásicas*, entonces la distribución de sus vectores de momento angular sería aleatoria dentro de un continuo y cada una de ellas sería deflexionada hacia arriba o hacia abajo en diferentes grados, produciendo una distribución continua en la pantalla de un detector. En el experimento las partículas fueron deflexionadas hacia arriba o hacia abajo, pero de manera discreta, dejando una marca de dos regiones puntuales en el detector, lo cual indicaba que el momento angular estaba cuantizado. Por supuesto, ésta es una descripción muy simplificada. Para una narración más extensa, detallada y con los elementos históricos pertinentes sobre el experimento, se pueden consultar Friedrich y Herschbach, 1998 y 2003; Stenson, 2005.

³² Se puede consultar en Ehrenfest, 1959: 452-455.

O. Stern y W. Gerlach hicieron pasar un haz de átomos de plata a través de un campo magnético para determinar si los átomos poseían un momento magnético y, si ése era el caso, qué orientación exhibía durante su travesía por el campo magnético. Su experimento arrojó como resultado muy significativo el siguiente: el momento magnético de todos los átomos coincide, durante su paso por el campo, con la dirección de las líneas de fuerza, quedando aproximadamente la mitad de los átomos en el sentido del campo y en sentido contrario la otra mitad. Surge de manera natural la pregunta sobre de qué manera los átomos obtienen esta orientación. (Ehrenfest, 1959: 452)

La pregunta que se hacen al final de este primer párrafo es una cuestión sobre la *causalidad* del proceso. Einstein y Ehrenfest, en su artículo, se esfuerzan por entender de qué manera los magnetos atómicos asumen una orientación definida, preestablecida, en el campo. En los párrafos siguientes, Einstein y Ehrenfest discuten de manera crítica algunas implicaciones del experimento, sobre todo la amenaza al ideal de causalidad, sugiriendo posibles explicaciones a los resultados del experimento, pero sin llegar a un esclarecimiento aceptable del problema.

En una carta, Einstein le comentaba a Born algunos aspectos sobre lo que había estudiado con Ehrenfest:

El logro más interesante en este momento es el experimento de Stern y Gerlach. La alineación de los átomos sin que haya colisiones vía intercambio de radiación no es comprensible de acuerdo con los métodos teóricos conocidos; tomaría más de 100 años para que los átomos se alinearan. He hecho algunos cálculos sobre esto con Ehrenfest. (Citada en Friedrich y Herschbach, 2003: 57)³³

Dichos cálculos se comentan en la sección 3 de su artículo. Para Einstein y Ehrenfest resulta un misterio cómo ocurre la orientación magnética de los átomos considerando que éstos entran al campo con orientaciones aleatorias y con una densidad en el haz muy baja, tal que prácticamente no ocurren colisiones para intercambiar energía. En la sección 4 sugieren dos posibilidades para salir de la dificultad presentada por los resultados del experimento:

³³ Carta de Einstein a Bohr, marzo de 1922.

A. El mecanismo real consiste en que los átomos nunca pueden estar en un estado en el que no estén completamente cuantizados.

B. Se llega a los estados por medio de rápidos efectos, lo cual va contra las reglas cuánticas relativas a la orientación; las condiciones requeridas por las reglas cuánticas se producen por medio de la radiación absorbida y emitida, pero con una rapidez de reacción mucho mayor que con una transición de un estado cuántico a otro. (Ehrenfest, 1959: 453)

Y aunque discuten brevemente las implicaciones de estas posibilidades, reconocen que en aquel momento no es posible dar una explicación completa. Los rompecabezas que todo esto representaba no se aclararían sino varios años después, con el desarrollo de la nueva mecánica cuántica y, sobre todo, con la llamada *interpretación de Copenhague*, que incorporaría el principio de incertidumbre de Heisenberg y que sí representaría un rompimiento más radical con la física clásica.³⁴

³⁴ De las dos opciones indicadas por Einstein y Ehrenfest, la que finalmente se impuso fue la primera. En 1924, Wolfgang Pauli propuso la introducción de un cuarto número cuántico (recordemos que los otros tres son: el número cuántico principal n que está relacionado con la energía del electrón y el tamaño de la órbita, el primer número cuántico orbital l asociado a la forma de la órbita, elíptica en general, y el segundo número cuántico orbital m relacionado con la orientación de la órbita o momento angular) para poder dar cuenta del efecto Zeeman (la separación de líneas espectrales en presencia de campos magnéticos intensos) y en 1925 formuló su ahora famoso *principio de exclusión* que señalaba que dos electrones en un mismo átomo no pueden encontrarse en la misma situación, es decir, no pueden poseer los mismos números cuánticos. Ehrenfest sospechó de inmediato que tendría que existir una relación entre el *principio de exclusión* y la impenetrabilidad de la materia. En 1927 escribió un artículo muy breve titulado “Relation between reciprocal impenetrability of matter and Pauli’s exclusion principle”. Se puede consultar en Ehrenfest, 1959: 546. Pero de mayor éxito fue la interpretación que dos de sus discípulos, Samuel Goudsmith y George Uhlenbeck, hicieron del cuarto número cuántico al asociarlo con la rotación del electrón sobre su propio eje (a lo que se le llamaría *spin* del electrón). Goudsmith dio cuenta de algunos detalles interesantes sobre la historia de este descubrimiento en una conferencia ofrecida en 1971 con motivo del jubileo de oro de la Sociedad Física Holandesa, que se encuentra transcrita en <http://www.lorentz.leidenuniv.nl/history/spin/goudsmit.html>.

CONCLUSIONES

Durante los primeros años del siglo XX, se fue reconociendo poco a poco que el trabajo de Planck involucraba algo más que la derivación de una fórmula exitosa para la radiación del cuerpo negro. Se argumentó que al cuantizar la energía, se iba en contra de algunos aspectos de la teoría clásica. Se escribieron distintos artículos que trataban de asimilar y entender las nuevas ideas. La familiaridad que Ehrenfest tenía con la mecánica estadística en general, y con el trabajo de Boltzmann en particular, le permitieron alcanzar esta comprensión. La interpretación de la importancia del cuanto de acción h surgió del reconocimiento, por parte de Ehrenfest, de que la fórmula de Planck involucraba una desviación sutil del enfoque combinatorio que Boltzmann había aplicado a los gases.

Una vez reconocida la importancia del trabajo de Planck, hombres como Bohr y Ehrenfest, a pesar de verse convencidos de que las teorías clásicas fallaban, se propusieron, sin embargo, explotar al máximo las mismas como parte del proceso de desarrollo hacia las nuevas teorías. Bohr lo hizo por medio de su principio de correspondencia, en tanto que Ehrenfest hizo lo propio con su principio adiabático. La heurística detrás de ambos principios consistió en considerar que la mecánica newtoniana seguía siendo válida en tanto un sistema permaneciera en un estado estacionario, mientras que la teoría cuántica daría cuenta de los saltos de un estado a otro. Con el principio adiabático en particular, si se conocían las reglas cuánticas de un sistema dado, entonces, aplicando teorías clásicas, se podían obtener las reglas correspondientes de otros sistemas. Lo que hemos querido resaltar con el ejemplo del trabajo de Bohr y Ehrenfest es que las teorías nuevas no se desarrollan desechando las viejas, sino por el contrario, trabajándolas de manera que permitan una asimilación de las mismas.

Pero como decíamos, en una revolución del conocimiento, finalmente surgen en verdad nuevos paradigmas con los que las nuevas teorías se desprenden de las anteriores. Tal fue el caso con el reconocimiento de que, si bien en el pasado se consideraron los fenómenos físicos macroscópicos como resultado estadístico de los procesos microscópicos de cambio causal (en la termodinámica y la mecánica estadística), ahora se reconocieron esos procesos como estadísticos en sí. Esa fue, al menos, la in-

interpretación de algunos experimentos que serían fundamentales para la nueva física que vendría unos años después.

BIBLIOGRAFÍA

- Becker, Bárbara J. (1987), "The effect of World War I on cooperation among european scientists: Progress in the development of atomic theory during the war" [<http://eee.uci.edu/clients/bjbecker/RevoltinIdeas/week9a.html>], consultado el 5 de marzo del 2007.
- Boeyink, Rowdy (2005), *In het centrum van het drama: Wetenschappelijke worstelingen van Paul Ehrenfest tussen 1916–1925*, tesis de doctorado, Utrecht, Holanda, Universiteit Utrecht.
- Bohr, Niels (1913), "On the constitution of atoms and molecules", *Philosophical Magazine*, vol. XXVI, pp. 1-25.
- Darrigol, Olivier (1992), "From c-numbers to q-numbers: The classical analogy in the history of quantum theory" [<http://ark.cdlib.org/ark:/13030/ft4t1nb2gv/>], consultado el 5 de marzo de 2007.
- Ehrenfest, Paul (1959), *Collected Scientific Papers*, Ámsterdam, Holanda, North-Holland Publishing Company.
- Einstein, Albert (1994), *Correspondencia con Michele Besso: 1903-1955*, Barcelona, España, Tusquets Editores.
- Einstein, Albert (1954), "Physics and reality", en *Ideas and Opinions*, Nueva York, Estados Unidos, Crown Publishers, pp. 290-323.
- Feyerabend, Paul (1997 [c. 1975]), *Tratado contra el Método*, Madrid, España, Editorial Tecnos.
- Friederich, Bretislav y Dudley Herschbach (2003), "How a bad cigar helped reorient atomic physics", *Physics Today*, vol. LVI, pp. 53-59.
- Friederich, Brestilav y Dudley Herschbach (1998), "Space quantization: Otto Stern's lucky star", *Daedalus*, vol. CXXVII, núm. 1, pp. 165-182.
- Forman, Paul (1984 [c. 1971]), *Cultura en Weimar, causalidad y teoría cuántica: 1918-1927*, Madrid, España, Alianza Universidad.
- Gamow, George (1985 [c. 1966]), *Thirty Years that Shook Physic*, Nueva York, Estados Unidos, Dover Publications.
- Hendry, John (1980), "Weimar culture, causality and quantum theory: 1918-1927", en Colin Chant y John Favuel (eds.), *Darwin to Einstein: Historical Studies on Science and Belief*, Nueva York, Estados Unidos, Longman, pp. 303-326.
- Klein, Martin J. (1985), *Paul Ehrenfest: The Making of a Theoretical Physicist*, Ámsterdam, Holanda, North-Holland Physics Publishing.

- Kuhn, Thomas S. (2002 [c. 1962]), *La estructura de las revoluciones científicas*, México, México, Fondo de Cultura Económica.
- Lunteren, Frans van (2003), "Paul Ehrenfest: de Leidse onderzoekschool van een fysicus in diaspora" [<http://www.rowdyboeyink.org/ehrenfest/images/Ehrenfest2.doc>], consultado el 4 de febrero de 2007.
- Mehra, Jagdish y Helmut Rechenberg (1982), *The Historical Development of Quantum Theory*, vols. I y IV, Nueva York, Estados Unidos, Springer-Verlag.
- Navarro, Luis y Enric Pérez (2004), "Paul Ehrenfest on the necessity of quanta (1911): Discontinuity, quantization, corpuscularity, and Adiabatic Invariance", *Archives for History of Exact Sciences*, vol. LVIII, núm. 2, pp. 97-141.
- Navarro, Luis y Enric Pérez (2006), "Paul Ehrenfest: The genesis of the adiabatic hypothesis, 1911-1914", *Archive for History of Exact Sciences*, vol. LX, núm. 2, pp. 209-267.
- Pais, Abraham (1991), *Niels Bohr's Times, in Physics, Philosophy, and Polity*, Nueva York, Estados Unidos, Oxford University Press.
- Radder, Hans (1991), "Heuristics and the generalized correspondence principle", *The British Journal for the Philosophy of Science*, vol. XL, núm. 2, pp. 195-226.
- Stenson, Jared R. (2005), *Representations for Understanding the Stern-Gerlach Effect*, tesis de maestría, UTAH, Estados Unidos, Brigham Young University.
- Szegedi, Peter (1999), "Correspondence or incommensurability?", en Imre Hronsky, Pal Tamás, Euz Tóth y Bruon Wöran (eds.), *Philosophical Studies on Science and Technology*, Budapest, Hungría, Arisztotelész Studium BT, pp. 143-149.
- Szumilewicz, Irena (1977), "Incommensurability and the rationality of the development of science", *The British Journal for the Philosophy of Science*, vol. XXVIII, núm. 4, pp. 345-350.
- Waerden, Bartel Leendert van der (1968), *Sources of Quantum Mechanics*, Nueva York, Estados Unidos, Dover Publications.
- Whitaker, Andrew (1996), *Einstein-Bohr and the Quantum Dilemma*, Cambridge, Reino Unido, Cambridge University Press.

Ricardo Guzmán Díaz: Ingeniero en Electrónica y Comunicaciones, en el Instituto Tecnológico de Monterrey (ITESM, 1980), Master en Electrónica (PII, Holanda, 1990) y Doctor en Estudios Humanísticos con especialidad en Ciencia y Cultura (ITESM, 2007). Actualmente es profesor de tiempo completo en el Tecnológico de Monterrey, Campus Monterrey donde imparte cursos de “Teoría de Circuitos”, “Teoría Electromagnética”, “Teoría del Conocimiento”, “Historia de la Ciencia” y “Ciencia, Tecnología y Sociedad”. Pertenece a la cátedra de investigación en Ciencia y Cultura del mismo Instituto. Como investigador ha realizado estudios de Historia y Filosofía de la Física, especialmente sobre el tema de los orígenes de la Física Cuántica. Ha participado como ponente en congresos nacionales y ha publicado varios artículos en revistas internacionales en México, Colombia, Venezuela, Chile y España.

José Antonio Cervera Jiménez: Doctor en Ciencias Físicas por la Universidad de Zaragoza (1999) y doctor en Estudios de Asia y África, especialidad China por El Colegio de México (2007). Actualmente es profesor de tiempo completo del Tecnológico de Monterrey, campus Monterrey, donde coordina el doctorado en Estudios Humanísticos, especialidad de Ciencia y Cultura, y es titular de la cátedra de investigación en Ciencia y Cultura. Como investigador es especialista en las relaciones científicas y culturales entre Europa, América y Asia en los siglos XVI y XVII. Autor del libro *Ciencia misionera en Oriente. Los misioneros españoles como vía para los intercambios científicos y culturales entre el Extremo Oriente y Europa en los siglos XVI y XVII* (Zaragoza, Universidad de Zaragoza, 2001). Ha publicado numerosos artículos en libros y revistas especializados; ha participado como ponente en congresos y simposios en diversos países de Europa, América y Asia. Desde enero de 2006. SNI I.

D. R. © Ricardo Guzmán, México D.F., enero-junio, 2010.

D. R. © José Antonio Cervera, México D.F., enero-junio, 2010.