

EPISTEMOLOGÍA E HISTORIA DE LA CIENCIA

SELECCIÓN DE TRABAJOS DE LAS VII JORNADAS

1997

Patricia Morey

José Ahumada

Editores



ÁREA LOGICO-EPISTEMOLÓGICA DE LA ESCUELA DE FILOSOFÍA
CENTRO DE INVESTIGACIONES DE LA FACULTAD DE FILOSOFÍA Y HUMANIDADES
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons atribución NoComercial-SinDerivadas 2.5 Argentina



APORTES HISTORICOS Y EPISTEMOLOGICOS PARA UN ESTUDIO DE CASOS: EL PRINCIPIO DE CORRESPONDENCIA

I

En el temprano desarrollo de la mecánica cuántica fue utilizado ampliamente por su fructividad un principio metodológico debido a Niels Bohr, el Principio de Correspondencia.

El mismo establecía que "las predicciones de la mecánica cuántica para el comportamiento de cualquier sistema físico deberán corresponder a las predicciones de la física clásica, en el límite en el cual los números cuánticos que especifiquen el estado del sistema se hacen muy grandes".⁽¹⁾ Llamaremos a esta la formulación restringida.

Una formulación alternativa, de carácter más general, considera a la mecánica clásica como un caso particular, límite, de la mecánica cuántica, en aquellas zonas donde la constante de Planck pueda ser considerada infinitamente pequeña.⁽²⁾

Se presentan habitualmente en diversos textos ejemplos en donde se ve la aplicación exitosa de este principio. Algunos de ello son:

a) En la electrodinámica clásica la frecuencia de la radiación emitida coincide con la frecuencia de giro del electrón orbitando alrededor del núcleo. En el modelo atómico de Bohr la frecuencia del fotón emitido al pasar el electrón de un nivel energético a otro es distinta a la frecuencia de giro en algunas de las órbitas permitidas, sin embargo si los números cuánticos intervinientes se hacen grandes ambas frecuencias coinciden.

b) A partir de los trabajos de Planck se sabe que la radiación emitida por un oscilador debe ser un múltiplo entero de h (constante de Planck) por la frecuencia f . La teoría de la radiación de Rayleigh-Jeans se ajusta razonablemente bien con los datos empíricos en el dominio de las frecuencias pequeñas. Sin embargo ambas teorías coinciden en esa zona, donde como se espera, los números cuánticos n son grandes.

c) En 1896 Wien sostuvo que la densidad de radiación estaba relacionada con la longitud de onda λ y la temperatura absoluta T . La expresión matemática correspondiente se adaptaba aceptablemente a los datos empíricos para valores pequeños de las longitudes de onda. La ecuación de Planck para la radiación del cuerpo negro se reduce a la anterior si calculamos el límite de la expresión para $\lambda \rightarrow 0$.

d) Partiendo de la variación temporal del valor medio de una magnitud cuántica A , se obtienen expresiones formalmente equivalentes a la segunda ley de Newton, en términos de valores medios (cambio temporal del valor medio de p igual al gradiente del valor medio

del potencial U, cambiado de signo). Para algunos físicos (entre ellos Feynmann) esta es una demostración palmaria de cómo a partir de presupuestos cuánticos se pueden obtener ecuaciones correspondientes al dominio clásico.

II

Evidentemente, la pretensión de incorporar teorías antiguas en el marco de las nuevas teorías, más amplias y de mayor poder explicativo, tal como lo explicita el principio de correspondencia, puede ser encuadrado en determinadas concepciones, tal el caso del empirismo lógico por ejemplo. En ese sentido, la opinión de E. Nagel es aclarativa al respecto: "el fenómeno de absorción por, o reducción de una teoría relativamente autónoma, a alguna otra teoría más amplia es una innegable y recurrente característica de la historia de la ciencia moderna"⁽³⁾.

En este marco, la tesis de reducción de teorías se destaca porque:

a) Supone que la ciencia establece teorías que al ser confirmadas ampliamente son aceptadas, con independencia del peligro de ser disconfirmadas en el futuro.

b) Establece que el avance de una ciencia tiene como característica el abrirse a horizontes cada vez más amplios, de manera que una teoría antigua jamás es rechazada de manera absoluta sino más bien 'encaja' en una nueva como caso límite.

c) Afirma que los términos teóricos de dos teorías, una de las cuales es caso particular de la otra, no modifican sus significados, estando éstos fijados sin ningún tipo de ambigüedad.

d) Se aplica principalmente a ciencias que han sido formalizadas.

Siguiendo esta línea argumental, podemos concluir que la actividad científica, tal como sería el caso de las ciencias físicas, es una empresa de carácter acumulativo, de ampliación y jerarquización de teorías existentes (T_1) por otras nuevas (T_2). Así, habría un acuerdo asintótico entre las T_2 y las T_1 , en aquellas partes donde las últimas estén confirmadas.

III

El principio de correspondencia, por lo menos en su versión restringida, tuvo su momento de mayor predicamento durante el periodo de vigencia de la mecánica cuántica antigua. Pese a que la formulación definitiva corresponde a Bohr, un valioso antecedente de esta técnica la encontramos ya en la elaboración de la segunda teoría del cuerpo negro de Planck en 1912.⁽⁴⁾ Un año después, Bohr al estudiar la estabilidad del modelo atómico planetario de Rutherford, planteó una hipótesis que relacionaba la razón de la energía cinética T del electrón orbitante y su frecuencia de giro f ; $(T/f)_n = K$, siendo K una constante a determinar. Con esa condición un electrón orbital no radiaría, pues se encontraría, en lo que se denomina un estado estacionario. En el desarrollo de su programa de investigación, y en el que obtuvo muchísima información a partir de las fórmulas

empíricas de los espectroscopistas, en particular la de Balmer, Bohr pudo hallar que $K = nh/2$ (siendo n un número entero y h la constante de Planck). Asimismo encontró las expresiones para el radio de la órbita, la frecuencia de revolución y de radiación y el valor de la energía. Como un intento de poder justificar su condición de cuantización fundamental ($T/f=K$), Bohr recurrió a tres aseveraciones, la más importante de las cuales era el acuerdo asintótico para grandes valores de n entre las frecuencias de radiación y las obtenidas mediante cálculos con la mecánica tradicional. Así para grandes valores de n y radios orbitales grandes las restricciones cuánticas al átomo desaparecerían; habría, entonces, un acuerdo numérico para las frecuencias espectrales, no importando el origen de los métodos de producción de dichas frecuencias.⁽⁵⁾ Asimismo, posteriormente, a fines de 1913, Bohr pudo obtener el valor de la constante de Rydberg sin acudir a hipótesis adicionales. El uso de esta metodología en Bohr estaba en su fuerte convencimiento de que las viejas teorías, en este caso la mecánica y el electromagnetismo clásicos, eran un buen soporte a partir del cual se podían edificar las nuevas explicaciones de los fenómenos en el nivel atómico, mediante la incorporación de hipótesis radicales y extramecánicas, tomadas, muy posiblemente, de las condiciones de cuantización de Planck y Einstein. Es de destacar que en ese contexto histórico, esta perspectiva de trabajo era una de las más promisorias herramientas a utilizar por los físicos en sus investigaciones, habida cuenta de la ausencia de una teoría integral que diera respuesta a la mayoría de las cuestiones que la física clásica no era capaz de dar. Tengamos presente que recién en 1914 Ehrenfest pudo disponer de justificaciones teóricas para explicar cuáles serían las magnitudes físicas susceptibles de cuantificar (los invariantes adiabáticos, que se obtenían a partir de la mecánica clásica). Más adelante, 1916, se obtuvieron las condiciones de cuantización para sistemas periódicos (reglas de Wilson-Sommerfeld). Muy sucintamente podríamos decir que esas eran todas las herramientas con las que contaba la mecánica cuántica antigua: principios heurísticos, justificaciones teóricas fundamentadas en la mecánica analítica clásica y una regla de cuantificación. El papel orientador de la mecánica clásica en aquellas zonas límites donde hubiera amplio respaldo empírico, junto con la yuxtaposición de cuantizaciones en aquellas zonas en donde hubieran conflictos entre la teoría y los hechos empíricos, era, sin embargo, el eslabón más débil de la cadena conceptual, por su carácter provisorio y falta de coherencia teórica. No obstante, su uso fue ampliamente justificado, (por necesidad histórica diríamos) no solamente porque permitió obtener resultados satisfactorios (por ejemplo, la explicación del espectro discreto del átomo de hidrógeno), sino porque también abrió las puertas al nacimiento de la física cuántica moderna. Esto está muy muy bien graficado por uno de los protagonistas de ese período, sir James Jeans, quien en su texto *Electricity and Magnetism* (1925) expresaba que: "The limiting case provides a bridge between the old mechanics and the new: on one side of the bridge the classical electrodynamics holds undisputed sway, but as we cross the bridge and advance into the territory on the other side, the additional restrictions imposed by the quantum dynamics become ever more important until finally they may be considered to govern the whole situation. The exploration of the territory on the far side of the bridge will provide work for a new generation of mathematical physicists..."⁽⁶⁾

Sin embargo, para esa nueva generación de físicos el principio de correspondencia no significaba un aporte novedoso en su arsenal teórico: se había desarrollado el nuevo formalismo y no era necesaria la permanencia del cordón umbilical que la ataba a las teorías clásicas. Como lo señala Agazzi "el principio de correspondencia fue un precioso y versátil instrumento heurístico para el desarrollo de la primitiva teoría de los cuantos y, en definitiva para la fundamentación de la misma mecánica cuántica. Sin embargo, con el transcurso del tiempo se reveló más irreconciliable con la otra idea de Bohr, la cual originó el llamado 'principio de complementariedad', y que consistía en el reconocimiento de una irreductibilidad esencial entre la mecánica clásica y la mecánica cuántica. Ello significaba el fin de la convicción de que ésta última era una 'generalización racional' de la mecánica clásica ... En todo caso el abandono del principio de correspondencia no tuvo lugar hasta 1925".⁽⁷⁾

Sin embargo, conviene hacer algunas aclaraciones. Primero, los años 1925-1926 pueden señalarse como el término de la aplicabilidad del principio de correspondencia en su versión restringida.

Segundo, la versión ampliada de este principio, que indica la condición límite de la mecánica clásica respecto de la mecánica cuántica, es de utilización permanente en los diversos textos standard de mecánica cuántica. Asimismo es defendida por algunos de los propios fundadores de la nueva teoría, como es el caso de W. Heisenberg. Este, en su libro Física y filosofía distingue cuatro sistemas conceptuales que alcanzaron una forma final rigurosa:

1) la mecánica clásica; 2) la teoría del calor; 3) la teoría de la relatividad y sus vínculos esenciales con la teoría electromagnética; 4) la teoría cuántica.

Para Heisenberg el primer sistema está contenido en el cuarto como caso límite en aquellos eventos donde la constante de acción (o de Planck) pueda ser considerada infinitamente pequeña. Incluso va más lejos aún. Al percatarse de la mutua independencia de los sistemas tercero y cuarto plantea la existencia de un quinto sistema teórico a desarrollarse, que contendrá a (1), (3) y (4) como casos límites.⁽⁸⁾

Creemos sin embargo que la permanencia de la versión ampliada del principio de correspondencia no tiene respaldo en la propia teoría física sino más bien en el credo filosófico de quienes lo sustentan, pues al estructurarse la mecánica cuántica de manera definitiva (en sus versiones ondulatoria y de matrices, más la generalización relativista de Dirac) aparecen diferencias esenciales entre dos edificios teóricos, tanto a nivel de cosmovisiones como de modificación sustancial de conceptos y formalismos.

IV

El reconocimiento de la existencia de profundos quiebres conceptuales en el paso de la mecánica clásica a la mecánica cuántica, cuyo primer indicio fue la noción de cuantización de la energía al estudiarse el problema de la radiación del cuerpo negro. El efecto de dicho quiebre fue de tal magnitud que E. Rutherford, uno de los pioneros en la investigación atómica, expresaba "lo extraño y casi fantástico que parecía el nuevo

concepto de radiación⁽⁹⁾ a los físicos de principio de siglo. Este reconocimiento de quiebres conceptuales, tanto por parte de divulgadores de la teoría cuántica como de actores presenciales del nacimiento de la misma, nos hacen ver, aparentemente, que estaríamos en presencia de algo mucho más complejo que una lineal y progresiva acumulación de datos, conceptos y formalismos. Como bien lo expresa M. Capek, "los conceptos clásicos se han transformado radicalmente ... pues aunque las palabras utilizadas por los físicos contemporáneos sean las mismas, sus connotaciones son totalmente distintas de las de sus equivalentes clásicos. Apenas hay similitud entre la materia de la física moderna y la substancia material del período clásico e igual sucede también en diversos grados con otros conceptos"⁽¹⁰⁾. Este hiatus conceptual entre ambas teorías es una consecuencia natural del modo radicalmente distinto de entender y estudiar el mundo físico por parte de los fundadores de la nueva teoría. Aspectos centrales de la cosmovisión clásica de la naturaleza fueron alterados (por ejemplo las nociones de determinismo, causalidad, continuidad, probabilidad, etc.). Lo anterior, sin embargo, no está relacionado linealmente con algunos objetivos expresos que se habían fijado los fundadores de la nueva mecánica, que era básicamente construir una nueva ciencia despojada de aquellos elementos que se consideraban metafísicos, no-científicos. Aquí es preciso recordar la insistencia de Dirac en el sentido de que a la ciencia solamente le incumben estudiar los objetos y fenómenos observables⁽¹¹⁾, de manera tal que conceptos claves en el marco clásico como trayectorias, órbitas electrónicas, frecuencias de revolución orbital, no tenían ningún significado definido en el nuevo marco conceptual. Sin embargo, este fenomenalismo explícito lo debemos entender como expresiones de la influencia que ejercían todavía las ideas de E. Mach en las distintas áreas del conocimiento científico durante buena parte de la primera mitad de este siglo. Por tanto se hace necesario insistir en separar las efectivamente revolucionarias contribuciones científicas (un nuevo modelo atómico, el formalismo cuántico, etc.) de las interpretaciones que se pueden hacer de la nueva teoría (en particular la denominada interpretación ortodoxa o de Copenhague).

V

El intento de Bohr al enunciar el principio de correspondencia implicaba resolver la gran diferencia conceptual entre el marco clásico y el cuántico, utilizando las áreas donde las predicciones de ambos se hallan superpuestas, resaltando de esta manera que más allá de las notorias diferencias la teoría clásica podría ser considerada un caso particular, límite de la teoría cuántica en aquellas zonas donde el cuanto de acción h pudiera ser considerado cero. Esta supuesta continuidad es la que analizaremos brevemente en algunos ejemplos.

i) Analizando el comportamiento de una partícula (por ejemplo un electrón) en una poza de potencial de paredes infinitas, la ecuación de Schrödinger nos permite calcular el valor medio del momento lineal p , que es cero. Por otro lado sabemos que desde el punto de vista clásico el resultado a esperar es no nulo. No hay manera posible de entender cómo el último resultado pueda ser considerado límite del anterior.

Sin embargo, para generalizar de manera más metódica las diferencias y ver que no todo es continuidad, sino que hay sobre todo ruptura conceptual y desarrollo no acumulativo durante el proceso de cambios de teorías, es preciso avanzar más allá del análisis de ejemplos técnicos puntuales. En ese sentido nos aparece oportuno utilizar el enfoque de Kuhn en *Comensurabilidad, comparabilidad y comunicabilidad*⁽¹²⁾. En ese texto Kuhn introduce como característica de las revoluciones científicas, o sea de aquellas etapas de desarrollo científico no acumulativo, la *inconmensurabilidad local*. Kuhn arguye que dos teorías T_1 y T_2 son *inconmensurables* si “no hay ningún lenguaje, neutral o de cualquier otro tipo, al que ambas teorías, concebidas como conjuntos de enunciados puedan traducirse sin resto o pérdida”⁽¹³⁾. Si bien el mismo Kuhn reconoce lo modesto de esta versión de *inconmensurabilidad* en comparación con la más radical aparecida en *La estructura de las Revoluciones Científicas* (1962), se ajusta razonablemente bien a nuestros propósitos como aproximación al abordar el fenómeno de cambio teórico.

Así, si analizamos:

ii) Tal como mencionamos en el ejemplo (d) partiendo del cálculo de operadores cuántico se puede llegar a expresiones formalmente semejantes (en valores medios) a la segunda ley de Newton que relaciona la fuerza externa aplicada a una partícula con la aceleración (relación causa-efecto). Al abordar el término fuerza vemos que tiene connotaciones radicalmente distintas en ambas teorías. En mecánica clásica newtoniana la fuerza es una medida de la cuantificación de la noción de causa, y a igualdad de ésta tendremos idénticos efectos. En cambio en mecánica cuántica una fuerza idéntica puede tener distintos efectos, cada uno de ellos con diferente grado de probabilidad. Asimismo en Newton la noción de partícula es esencial (pongamos por caso un electrón) y está caracterizada por su posición y su momento, en tanto que los objetos cuánticos no son partículas en el sentido tradicional del término puesto que carecen de delimitación precisa (son objetos dispersos en virtud del principio de incertidumbre de Heisenberg), además no tienen una trayectoria exacta en su movimiento. Tanto es así que algunos autores han propuesto nombres distintivos a los entes cuánticos como por ejemplo *cuantones* o *particuanlas*⁽¹⁴⁾. Por otro lado, teniendo también en cuenta las particularidades de los objetos microscópicos, se ha sostenido que en mecánica cuántica serían partículas aquellos entes que están caracterizados por un set de observables superseleccionados (carga, masa, espín, etc.) más las potencialidades de otras variables.

VI

La tendencia original de Bohr de atribuir una condición de inclusión de la teoría clásica dentro de la teoría cuántica, se vio modificada sustancialmente al quedar explicitado el principio de complementariedad. Al hacer hincapié en la indivisibilidad del sistema (micromundo+aparato de medición), se vio obligado a reconocer la necesaria persistencia del lenguaje clásico dentro del naciente aparato conceptual, sumada a la aparición de propiedades contradictorias en los microobjetos según fuera la interacción con los aparatos de medida (por ejemplo en algunas circunstancias el electrón se comportaba como onda, en

otros como partícula) o incluso analizando el propio modelo atómico de Bohr de 1913 en donde coexistían la continuidad de órbitas en los estados estacionarios con la presencia de saltos cuánticos discontinuos.

La presencia permanente de dos lenguajes excluyentes entre sí, pero imprescindibles ambos, llevó a Bohr a elaborar la complementariedad, cuyo primer esbozo se realizó en el Congreso de Como en 1927 y que a posteriori constituye parte del núcleo duro de lo que se conoce como interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica: el mundo cuántico está supeditado al mundo clásico, pues este es el decodificador del micromundo mediante los instrumentos de medida, o sea sólo existe a través de él. Vemos entonces que dentro de este planteo hay una inversión argumental respecto de lo que suponía el principio de correspondencia, ya no existe esa relación de inclusión de la teoría clásica respecto de cuántica, lo que tenemos ahora son dos bloques teóricos paralelos mutuamente excluyentes pero necesarios para la descripción del mundo físico, a lo que se le adiciona un rango de subsidiariedad del mundo cuántico respecto del clásico.

No es intención del presente trabajo el análisis más o menos detallado de la interpretación de Copenhague. Sólo nos interesa resaltar que siendo la visión aceptada por una importante mayoría de los físicos, se torna incompatible con la presencia de la versión generalizada del principio de correspondencia tal y como aparece en muchos de los textos de uso y trabajos de divulgación de la física cuántica. Sumado a ello, y desde una perspectiva radicalmente diferente, las críticas basadas en las nociones de inconmensurabilidad local entre las dos estructuras teóricas (si bien, creemos, se podría sostener una posición más concluyente dentro de una versión no tan débil como la del 2º Kuhn) nos hacen ver la innecesaria persistencia del principio de correspondencia y de análisis epistemológicos como los de Nagel y su escuela.

Una aclaración última. Pensamos que, si bien, el principio de correspondencia general no puede sostenerse, vemos que sí cumplió un papel importantísimo mientras persistía la crisis de los viejos modelos y no había una estructura teórica suficientemente sólida en donde apoyar los trabajos de investigación en el micromundo. En esa etapa, quizá, la inconmensurabilidad no jugó ningún rol en el desarrollo de las ideas, y no sólo debido a que es una noción de uso del filósofo y no del físico, sino que por sobre todo es un concepto aplicable cuando tenemos dos visiones, dos edificios teóricos antagónicos ya definitivamente establecidos.

AGRADECIMIENTOS: El autor agradece al Prof. Edgardo Datri las distintas sugerencias dadas al presente trabajo.

Bibliografía

- (1) EISBERG, ROBERT. M.: "Fundamentos de Física Moderna". Ed. LIMUSA, México, 1992, pág.140.
- (2) MESSIAH, A.: "Quantum Mechanics". North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 1961, pág. 214.

(3) SUPPE, F. : "La estructura de las teorías científicas", Editora Nacional, Madrid, 1979.

(4) KUHN, Th. S. : "La teoría del cuerpo negro y la discontinuidad cuántica, 1894-1912". Alianza Editorial, Madrid, 1987, pág. 287.

(5) HEILBRON, J. : "Bohr's first theories of the atom", Physics Today, Vol. 38, 10, 1985.

(6) JEANS, J. H. : "The Mathematical Theory of Electricity and Magnetism". Cambridge University Press, Londres, 1925, pág. 645.

(7) AGAZZI, E.: "Temas y problemas de filosofía de la física". Ed. Herder, Barcelona, 1974, pág. 304.

(8) HEISENBERG, W.: "Física y Filosofía". Ediciones La Isla, Buenos Aires, 1959, pág. 78-79.

(9)-(10) CAPEK, M. : "El impacto filosófico de la física contemporánea". Ed. Tecnos, Madrid, 1973, pág. 13-14.

(11) DIRAC, P.A.M. : "Principios de Mecánica Cuántica". Ed. Ariel, Barcelona, 1967, pág.17.

(12)-(13) KUHN, Th. S. : "Commensurabilidad, comparabilidad y comunicabilidad" en Qué son las revoluciones científicas. Ed. Paidós Ibérica, Barcelona, 1989, pág. 99.

(14) BUNGE, M. : "Controversias en física". Ed. Tecnos, Madrid, 1983, pág. 169.

ACLARACION: El presente trabajo se halla enmarcado dentro del proyecto "Las nociones de cambio teórico y progreso científico en la obra de Th. Kuhn. Críticas, réplicas y contrastes", dependiente de la Fac. de Humanidades, Universidad Nacional del Comahue.