

BOHR Y LOS FUNDAMENTOS DE LA MECÁNICA CUÁNTICA

José L. Sánchez Gómez
Departamento de Física Teórica,
Universidad Autónoma de Madrid

INTRODUCCIÓN

Dos de las tres teorías más importantes de la ciencia actual pertenecen al dominio de la física: la teoría de la relatividad (especial y general) y la mecánica cuántica (la tercera sería la moderna teoría celular, particularmente en referencia a la base molecular del código genético, cuya relación con la física cuántica es probablemente más estrecha de lo que se piensa en la actualidad). Como probablemente se ha discutido ya en este seminario, la teoría de la relatividad especial, no obstante su nombre, se basa en un absoluto: la invariancia de la velocidad de la luz con respecto al estado de movimiento del observador; asimismo, la mecánica cuántica nace de la constatación de otro absoluto, en este caso la indivisibilidad del cuanto de acción, h (la famosa constante de Planck).

En esta conferencia vamos a tratar casi exclusivamente de la importante cuestión de la fundamentación de la teoría cuántica, en particular de las ideas de Bohr al respecto, que junto a las aportaciones de Born y Heisenberg dieron origen a lo que hoy se conoce como "Interpretación Ortodoxa" (o "de Copenhague") de la mecánica cuántica. Discutiremos asimismo la crítica a dichas ideas, en especial la de Einstein, quien nunca aceptó como algo definitivo el indeterminismo cuántico, así como la inexistencia de una realidad objetiva, independiente del observador, que se infiere necesariamente de los asertos



de la interpretación de Copenhague. Finalizaremos con una breve exposición de algunos aspectos importantes de la fundamentación de la teoría cuántica en relación con la cosmología actual.

Pero antes de entrar de lleno en el tema no puedo resistirme a citar a uno de los grandes maestros de la física teórica del presente siglo, Richard Feynman, premio Nobel de Física en 1965 (fallecido hace unos años), quien en ocasión de una conferencia sobre mecánica cuántica en la Cornell University, dirigida a un público constituido en su mayoría por gente no experta en esta disciplina decía:

"...Creo poder decir con toda tranquilidad que nadie comprende la mecánica cuántica... Les voy a describir cómo se comporta la Naturaleza. Si ustedes sencillamente aceptan que tal vez se comporte de esa manera, les va a parecer que se trata de algo espléndido y maravilloso. Si pueden evitarlo, no vayan por ahí preguntándose '¿Pero como puede ser?', porque van a meterse en un lío del que nadie ha conseguido aún salir. Nadie sabe como puede ser".

(Reproducido en el "Carácter de la ley física", de Richard P. Feynman, Edit. Antoni Bosch, Barcelona).

Feynman tenía en gran parte razón; no obstante, se tratará aquí, si no de explicar "¿cómo puede ser?" (algo por ahora casi imposible) al menos de formular con claridad qué es lo que hace tan peculiar, tan extraña, a la teoría cuántica. A tal fin, se seguirá el espíritu de Bohr cuando afirmaba "quien no se sienta verdaderamente perplejo ante la teoría cuántica es que de hecho no la comprende". Veamos pues las razones fundamentales de esa (presunta) perplejidad, pero antes es tal vez conveniente hacer una breve incursión histórica en el origen de las ideas básicas de la teoría cuántica.

PEQUEÑA DIGRESIÓN HISTÓRICO-CRÍTICA

La formulación "ideológica" de la mecánica cuántica se produjo esencialmente en los años 1925-28, pero antes hubo unas etapas de, digamos, construcción "física" de la teoría, que podríamos resumir así:

1. (Planck, en torno a 1900). En 1896 Wilhelm Wien formuló una ecuación para la densidad de energía de la radiación de cuerpo negro a temperatura T y frecuencia ν ,

$$\ell_{\nu} = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} e^{-h\nu/kT}$$



Esta ecuación explicaba todos los datos experimentales disponibles en ese tiempo, que se reducían a frecuencias relativamente altas y bajas temperaturas. Pero justo a finales de siglo, aparecieron resultados, a frecuencias más bajas y temperaturas más altas, que no concordaban con la ley de Wien. En 1900 Max Planck se las ingenió para deducir una fórmula empírica de acuerdo con los resultados experimentales en todas las gamas de frecuencias y temperaturas. Esta fórmula es:

$$\ell\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

que estaba de acuerdo con los nuevos datos a bajas frecuencias y altas temperaturas y se reducía a la ley de Wien para altas frecuencias y/o bajas temperaturas.

Es sabido que para deducir esta ley Planck se vio obligado a suponer que la absorción de radiación por el cuerpo negro no se realiza de manera continua, sino "a saltos", y en cada uno de tales saltos se absorbe una energía $E = h\nu$, donde h es una constante con dimensiones de acción (energía x tiempo). Esto se considera como el nacimiento de la teoría cuántica. (Aunque no por todo el mundo; por ejemplo, Thomas S. Khun en su conocido libro "La teoría del cuerpo negro y la discontinuidad cuántica" afirma que no hay nada "revolucionario" en el trabajo de Planck, al que considera un mero ejercicio empírico. Esto es bastante discutible, pero no es objeto de esta conferencia analizarlo). En todo caso, la teoría cuántica empezó realmente a ser tomada en serio a partir de los trabajos de Einstein (y de Ehrenfest) en los cuales el concepto del cuanto de acción se aplicaba con éxito al estudio de los calores específicos de los sólidos.

2. (Einstein, a partir de 1905) Naturaleza cuántica de la luz.

En 1905, Einstein introdujo la hipótesis cuántica (más allá del mecanismo de absorción de la radiación) en la naturaleza de la radiación electromagnética, afirmando que ésta (en particular, la luz) consiste en cuantos de energía, más tarde denominados fotones. Esta si era una hipótesis revolucionaria y, de hecho, tardó cerca de veinte años en ser aceptada.

Como es sabido, Einstein se vió conducido a esta hipótesis al tratar de entender la naturaleza del efecto fotoeléctrico, en particular el hecho experimental de que la energía de los electrones emitidos no depende de la intensidad de la radiación (como sería el caso según la teoría electromagnética clásica), sino de la frecuencia de la misma.

El efecto fotoeléctrico fue descubierto realmente por Hertz como un fenómeno hasta cierto punto secundario en experimentos que de hecho trataban de verificar la validez de la teoría de Maxwell de las ondas electromagnéticas. El



fenómeno consiste en la emisión de electrones por una superficie metálica sobre la que se hace incidir luz suficientemente intensa. Ahora bien, el aspecto más interesante de dicho fenómeno fue señalado por Lenard, quien demostró experimentalmente que la energía de los fotoelectrones (electrones emitidos por el metal) no dependía de la intensidad de la luz incidente, sino de la frecuencia de la misma. Este hecho es completamente inesperado en el marco de la teoría electromagnética (ondulatoria) clásica de la luz, pues la densidad de energía "acumulada" en las ondas depende, de acuerdo con dicha teoría, de la intensidad de la radiación electromagnética y por consiguiente de la intensidad luminosa incidente sobre la superficie metálica. Por lo tanto, siempre según esta teoría, la energía transferida por la luz a los electrones del metal debería crecer al hacerlo la intensidad luminosa y los electrones que se escapan del metal habrían de salir entonces con mayor energía del mismo.

Poco después de la formulación por Planck de la hipótesis de la discontinuidad de los procesos de emisión y absorción de la radiación electromagnética (1900), que se considera como el origen de la teoría cuántica, Einstein (1905) propuso tratar la radiación luminosa como un conjunto de corpúsculos (cuantos de luz) cada uno de ellos de energía $h\nu$, siendo h la constante universal de acción de Planck ($h = 6.628 \times 10^{-27}$ erg.s) y ν la frecuencia de dicha radiación (actualmente esta relación suele escribirse $E = \hbar\omega$ donde $\hbar = h/2\pi$, y $\omega = 2\pi\nu$ es la frecuencia circular). El correspondiente momento del cuanto de luz viene dado por $p = \hbar\omega/c$, donde c es la velocidad de la luz.

De acuerdo con Einstein, lo que tiene lugar en el efecto fotoeléctrico es que un cuanto de luz transfiere su energía a un electrón del sólido en un proceso de tipo colisión. Dicho electrón se encuentra inicialmente ligado al metal y entonces tiene energía negativa, $-b$ (por definición, el punto cero de energía es cuando el electrón se encuentra en reposo fuera del metal). La ecuación que describe el proceso es entonces $\hbar\omega = \frac{1}{2}mv^2 + b$, donde v es la velocidad con la que el electrón sale del metal. Por supuesto, la cantidad b depende de la sustancia metálica utilizada. La ecuación anterior es la llamada ley de Einstein, que fue ampliamente confirmada posteriormente (sobre todo por los históricos experimentos de Millikan) y que proporcionó al genial creador de la teoría de la relatividad el premio Nobel de Física en 1921.

Así, pues, la explicación del efecto fotoeléctrico parece requerir una naturaleza corpuscular de la luz, de acuerdo con el paso decisivo dado por Einstein. Pero no debe pensarse que la hipótesis de éste fue un salto en el vacío, ya que de hecho Einstein llevaba ya algún tiempo investigando las propiedades termodinámicas de la radiación electromagnética en equilibrio, lo que en cierto modo le condujo a dicha hipótesis. Aunque al principio (1905) ésta se formuló de manera heurística, después (1909-17) fue elaborada más amplia y for-



malmente, dando lugar, entre otras cosas, a la primera formulación de las relaciones entre la absorción de radiación por átomos y la desintegración espontánea e inducida de los mismos (en el libro de L. Navarro, ver Biblio., se estudia la evolución de las ideas de Einstein, desde los primeros trabajos (1904) hasta su contribución final en este campo: la estadística de Bose-Einstein de 1924-25).

Si bien es cierto que el efecto fotoeléctrico proporcionó la primera evidencia seria de la naturaleza corpuscular de la luz, ésta quedó verificada sin lugar a dudas tras el hallazgo, en 1923, por el físico norteamericano A.H. Compton del efecto que lleva su nombre. Al estudiar la dispersión de rayos X por diversas sustancias, Compton observó que la radiación saliente (dispersada) cuya dirección formaba un cierto ángulo ν con la de la radiación incidente tenía una longitud de onda diferente de la de esta última, y la diferencia, $\Delta\lambda$, venía dada por $\Delta\lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos\theta)$, donde λ es la llamada longitud de onda Compton del electrón, que viene dada por la expresión $\lambda_e = h/mec = 2\lambda h/mec$, siendo su valor numérico $\sim 2.43 \times 10^{-10}$ cm.

El efecto Compton se explica fácilmente como un fenómeno de colisión elástica entre un cuanto de radiación (rayos X en este caso) y un electrón de la sustancia irradiada. El hecho de que en la fórmula anterior no entren las características de dicha sustancia revela que la dispersión de la radiación viene producida por los electrones libres (o, más propiamente, "casi libres") de aquélla. Observando el diagrama de la figura 1, se pueden escribir inmediatamente las relaciones de conservación de la energía y del momento (debido a que la radiación X posee una energía apreciable, ha de usarse cinemática relativista):

Fig. 1

$$hv_0 = hv + mc^2 \left(\frac{1}{(1 - \beta^2)^{1/2}} - 1 \right)$$

$$\frac{hv_0}{c} = \frac{hv}{c} \cos\theta + \frac{mv}{(1 - \beta^2)^{1/2}} \cos\phi \quad (1)$$

$$0 = -\frac{hv}{c} \sin\theta + \frac{mv}{(1 - \beta^2)^{1/2}} \sin\phi$$

A partir de estas, se llega fácilmente a la ecuación anterior. No obstante, es conveniente observar que esta última ecuación puede también obtenerse mediante el electromagnetismo clásico, es decir considerando que la radiación tiene estrictamente un carácter ondulatorio, siempre que se tenga en cuenta el efecto Doppler en la radiación dispersada; sin embargo, a partir de las ecs.(1) se llega a una relación entre la dirección de la radiación dispersada y el momento final



del electrón que no es posible obtener "clásicamente", y es esto lo que, de hecho, prueba la necesidad de introducir el aspecto corpuscular de la radiación para explicar satisfactoriamente el efecto Compton.

Vemos entonces que el efecto fotoeléctrico muestra que la luz ordinaria ("visible") posee, de algún modo, naturaleza corpuscular, mientras que el efecto Compton hace otro tanto en el caso de los rayos X. Por otra parte, se sabe que existen innumerables experimentos de interferencia y difracción en los cuales la naturaleza ondulatoria de la luz es manifiesta. Más aún, analizando ciertos experimentos de difracción de rayos X por cristales, von Laue, en el primer cuarto del siglo actual, llegó a la conclusión de que dicha radiación poseía indudables propiedades ondulatorias; así que la paradoja estaba servida: en ciertas ocasiones la luz (en general, la radiación electro-magnética) aparecía como constituida por corpúsculos, mientras que en otras se comportaba de manera estrictamente ondulatoria.

3. La naturaleza "ondulatoria" de la materia (de Broglie, 1924; Schrödinger, 1925-26; Born, 1926).

Un tanto inesperadamente, la solución (o al menos lo que la mayoría de la comunidad científica considera como tal) vino a través de otra paradoja. En 1924, Louis de Broglie formuló su atrevida hipótesis acerca de la naturaleza ondulatoria de los corpúsculos materiales. Haciendo uso de argumentos tomados de la relatividad einsteniana, este científico francés llegó a la conclusión de que a todo corpúsculo material, de momento p , había de asociársele una onda de longitud de onda $\lambda = \frac{h}{p}$. En la formulación de de Broglie no estaba clara la naturaleza de estas ondas ni su ley de evolución dinámica; esta última fue descubierta por Schrödinger (la famosa ecuación que lleva su nombre) mientras que la primera cuestión fue aclarada por Born al interpretar las "ondas de materia" como realmente "ondas de probabilidad", es decir que lo que indican es la probabilidad (o, mejor, densidad de probabilidad) de que un corpúsculo se encuentre en un determinado punto del espacio. Esta naturaleza ondulatoria (aunque ciertamente un tanto sui generis ¡ondas de probabilidad!) fue verificada por Davisson y Germer en EE.UU. y Thomson en Gran Bretaña, mediante experimentos de difracción de electrones por cristales; véase el libro de Hey y Walters (Biblio.) para más información sobre este tema.

Así pues la situación al final de la segunda década de este siglo era ciertamente confusa: tanto la luz como la materia se comportaban unas veces de manera corpuscular y otras de manera ondulatoria. Basándose en esto, Bohr formuló el "principio de complementariedad", que "explicaba" tan extraño comportamiento no como una característica intrínseca y absoluta de la luz y de la materia sino como un aspecto "relacional" de ambas: de acuerdo con dicho principio tanto la naturaleza corpuscular como la ondulatoria se manifiestan en experi-



mentos excluyentes entre sí (es decir, no existe ningún dispositivo experimental que ponga de manifiesto a la vez la naturaleza ondulatoria y corpuscular de la materia, ni tampoco de la radiación). Aunque este principio se formuló un tanto vagamente –véase la obra de Bohr citada en la Biblio– es indudable que desempeñó un papel decisivo en la construcción de la mecánica cuántica, llevada a cabo por Heisenberg, Schrödinger y Dirac de 1925 a 1928.

Fue este último quien por entonces creó la primera teoría cuántica de la radiación, que englobaba los aspectos corpusculares y ondulatorios de ésta. Más tarde, se incorporó en la teoría el mecanismo de interacción materia-radiación de acuerdo con los principios de la mecánica cuántica, por lo que automáticamente aquélla satisfacía el principio de complementariedad, es decir la estricta dualidad onda-corpúsculo, que se convirtió así en uno de los pilares de la teoría, núcleo de las ideas de Bohr que pasamos a discutir.

IDEAS DE BOHR, "INTERPRETACIÓN DE COPENHAGUE"

Como acaba de decirse el principio de complementariedad es del todo central en la comprensión de Bohr de la mecánica cuántica. La tesis general de Bohr implica la idea de que es posible, y tal vez necesario, hacer uso de conceptos clásicos (los de la experiencia humana común) en la física cuántica, aunque estos no sean en principio adecuados en el dominio cuántico (de las partículas subatómicas, átomos, etc.); pero podemos usar esos conceptos dentro de los límites del cuanto de acción h , más allá de tales límites los conceptos clásicos dejan de estar bien definidos. Un caso particular de complementariedad es la relación de incertidumbre (Heisenberg) para posición y momento: en mecánica clásica las partículas siguen trayectorias, en las que en cada instante una partícula cualquiera tiene posición y velocidad (y, por lo tanto, momento o cantidad de movimiento) bien definidas, mientras que en mecánica cuántica esto resulta imposible debido a la relación de Heisenberg $\Delta x \Delta p \sim h$.

Mientras que hasta 1927 la idea dominante, impulsada por Bohr, era que la mecánica cuántica podía considerarse, en un sentido bastante amplio, una generalización de la clásica, con la que "enlazaba" via el principio de correspondencia (que el mismo Bohr formuló en los "gloriosos" días de la creación de su modelo atómico), pronto la mayoría de los físicos se dieron cuenta de las tremendas y extrañas implicaciones de la teoría cuántica. Esto fue así sobre todo después de que Max Born, en 1926-27, introdujera el concepto de onda cuántica, que aunque formalmente equivalente -en cierto sentido matemático- al de onda clásica, es esencialmente distinto de éste: las "ondas" cuánticas son ondas de probabilidad. Dicho con más precisión, la solución de la ecuación de Schrödinger, $\varphi(x,t)$, para una partícula que se mueve en un potencial $V(x)$: representa, en realidad, la



amplitud de probabilidad de que dicha partícula esté en el punto x en el tiempo t , o, con más precisión matemática $\varphi^2(x,t)d\delta$ representa la probabilidad de que la partícula se halle en un dominio tridimensional $d\delta$ dado en el tiempo t .

Mientras que para sistemas de una partícula la hipótesis, llamada "probabilística", de Born no parecía originar graves problemas de interpretación (aunque científicos de tan notorio prestigio como Schrödinger y el mismo Einstein manifestaron muy pronto su desacuerdo con tal hipótesis), la cosa cambiaba totalmente al aplicarla a sistemas de varias partículas: como veremos enseguida, en tal caso aparece un misterioso tipo de correlaciones entre las partículas, cuya naturaleza no es la de las correlaciones ordinarias ("dinámicas") entre sistemas clásicos en interacción; se dice entonces que "la realidad del mundo cuántico no es separable (es 'holística, utilizando un término filosófico de moda)". Esto ya lo dijo, tan pronto como en 1935 y con toda claridad, Schrödinger:

"Cuando dos sistemas...interactúan durante cierto tiempo... y después se separan otra vez, entonces ya no pueden describirse del mismo modo que al principio, esto es con vectores estado independientes. No llamaría a esto una sino la característica de la mecánica cuántica". No es el objeto de esta charla el análisis exhaustivo de la "filosofía" (cosa por otra parte ardua, pues el pensamiento bohriano es frecuentemente algo confuso y sus ideas a veces un tanto contradictorias), sino que nos centraremos en la parte de dicha filosofía que se ha dado en llamar, como ya se dijo al principio, "Interpretación de Copenhague", en cuyas ideas participaron también Heisenberg, Born, Jordan, etc., y que es aunque con ciertos matices- la sostenida por la mayoría de la comunidad científica.

Los puntos que nos interesa resaltar (los básicos, por otra parte) de esta interpretación de la mecánica cuántica son:

i) La teoría cuántica es universal; el carácter probabilístico de la naturaleza es irreducible; el indeterminismo no se "elimina" mediante más conocimiento experimental, pues dicho conocimiento está limitado por el carácter absoluto del cuanto de acción, o, en otras palabras, del principio de Heisenberg.

ii) La evolución temporal de un sistema dinámico está regida por dos mecanismos distintos: por una parte hay una evolución dinámica de tipo determinista, continuo que viene dado por la ecuación de Schrödinger. Este tipo de evolución se produce en el caso de sistemas "aislados", o sea no sujetos a observación (o medida). Por otro lado, cuando el sistema microscópico (es decir, partícula, átomo, etc) se observa mediante un sistema macroscópico (aparato de medida), se produce un salto cuántico, un proceso discontinuo, desde una superposición de estados a uno bien definido (autoestado del obser-



vable que se mide). Es este proceso discontinuo, el "salto cuántico", el responsable de la mayoría de los problemas de interpretación de la teoría. Esto es básicamente debido a que ambos procesos son matemáticamente incompatibles entre sí; de ahí que, dado que el primero de ellos ha sido verificado experimentalmente más allá de toda duda razonable, sea el segundo el que esté en cuestión.

Bohr argüía que este principio (llamado de "reducción del paquete de ondas" y, también, "colapso de la función de onda") no era "matematizable" desde la propia teoría, en el sentido de que ésta necesita un sustrato "clásico" para su formulación; en breve; el "observador" es imprescindible y su naturaleza no es explicable matemáticamente mediante la teoría cuántica. Es sabido que esta dualidad da lugar a ciertas paradojas, como la del "gato de Schrödinger", la del "amigo de Wigner", etc. Por razones de brevedad, no las discutiremos aquí. En cambio, lo que si discutiremos es el problema de la no-separabilidad en la mecánica cuántica, que marcó el punto culminante del debate Bohr-Einstein, uno de los más profundos y apasionantes de la historia de la física.

EINSTEIN V. BOHR: ¿ES LA MECÁNICA CUÁNTICA UNA TEORÍA COMPLETA?

Es usual asociar la oposición de Einstein a la teoría cuántica al indeterminismo de ésta, pero esto debe matizarse. Es verdad que para Einstein el universo se rige, finalmente, por leyes deterministas, pero no era éste el punto esencial de las dudas de Einstein respecto al carácter de definitiva que los "padres" de la mecánica cuántica atribuían a su "criatura". Era, sobre todo, el hecho de que la mecánica cuántica parece indicar la inexistencia de una realidad física objetiva, independiente del observador, lo que motivaba en lo profundo la oposición de Einstein a dicho carácter definitivo de la teoría, a la cual consideraba enormemente positiva, pero provisional y sujeta a mejora por una eventual teoría causal, determinista y objetiva. En 1935, Einstein (y sus colaboradores Podolsky y Rosen) publicaron un trabajo (conocido como EPR) en el que intentaban probar que la teoría cuántica no puede ser completa. Según EPR un requisito necesario para que una teoría sea completa es el siguiente:

"Todo elemento de la realidad física debe tener su reflejo en la teoría" (un elemento de la teoría que represente fidedignamente el elemento de la realidad física).

EPR definen elemento de la realidad física como sigue:

"Si, sin perturbar en modo alguno el sistema, podemos predecir con cer-



teza (probabilidad uno) el valor de una magnitud física, entonces existe un elemento de realidad física correspondiente a la realidad física".

Aunque no lo explicitaron, el argumento de EPR requiere una definición de separabilidad. Una definición clara la dio más tarde (1949) Einstein, relacionándola con el carácter causal de la relatividad:

"La situación fácticamente real del sistema S no debe depender de lo que se haga en algún sistema S que se halle causalmente separado del primero". Esto se conoce como "separabilidad de Einstein".

Armados de esta "maquinaria", EPR tratan de probar que la mecánica cuántica no es una teoría completa (los detalles se darán en la exposición oral). En realidad el trabajo EPR es un correcto teorema matemático, de manera que, si se admiten las premisas la conclusión es necesariamente cierta. Bohr era por supuesto, consciente de ello, así que atacó a EPR justamente en la necesidad de aquéllas. Según Bohr:

"En nuestro punto de vista, el criterio de realidad física que proponen EPR contiene una ambigüedad en lo que se refiere al significado de la expresión 'sin en modo alguno perturbar el sistema'. Desde luego, en el caso considerado no hay cuestión alguna de perturbación mecánica del sistema... Pero incluso en la etapa crítica del procedimiento de medida se da la cuestión básica de una influencia sobre las condiciones que definen el tipo posible de predicciones concernientes al comportamiento futuro del sistema".

(De nuevo el subjetivismo, el observador). Las cosas permanecieron confusas (desde el punto de vista "filosófico", en lo estrictamente práctico—"científico"—la mecánica cuántica no se cuestionaba en absoluto) hasta 1964-65, cuando el físico británico John Bell demostró que si la teoría cuántica es experimentalmente correcta la realidad física no puede ser separable (o bien -caso extremo- no hay una realidad física en absoluto). Este es el sentido de las famosas "desigualdades de Bell" con las que se puede confrontar experimentalmente la mecánica cuántica y las teorías realistas locales y separables. Es sabido que la confrontación ha resultado claramente favorable a la teoría cuántica, particularmente tras los cuidados experimentos de Aspect y colaboradores en París (1982-83). En definitiva, es incuestionable la existencia de las misteriosas correlaciones cuánticas, al margen de cualquier tipo de interpretación de la teoría.



UNA CUESTIÓN ACTUAL: ¿PUEDE APLICARSE LA MECÁNICA CUÁNTICA AL UNIVERSO COMO SISTEMA FÍSICO CERRADO?

Si la teoría cuántica es "completa", deberá poder hablarse de la "función de onda del universo" y de cosmología cuántica. De hecho, Hawking y col. vienen investigando desde hace algún tiempo en estos temas con resultados interesantes (en el campo teórico, por supuesto). El problema con la interpretación de Copenhague, es que obviamente no hay ningún observador físico fuera del universo, así que ¿cómo se hace entrar en juego el postulado de reducción, fundamental –como ya hemos discutido– para formular la interpretación de la teoría consistentemente? Existe una interpretación alternativa de la teoría cuántica que no tiene este problema y que, por ello, es la preferida en cosmología cuántica: la denominada interpretación de "muchos universos", en la que no se necesita observador, pero se paga el precio de la existencia de una ramificación (casi infinita) del universo, subsecuente a los correspondientes procesos de medida. La cuestión de la función de ondas del universo es tal vez la más básica de la teoría cuántica actual; su eventual resolución aclararía grandemente los primerísimos instantes del cosmos.

BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA:

a) General

ALASTAIR RAE, "Física cuántica, ¿ilusión o realidad?" (Alianza Universidad). Un libro claro y bastante completo, de un nivel no excesivamente técnico.

P. C. W. DAVIES Y J. R. BROWN, "El espíritu en el átomo" (Libro de bolsillo, Alianza Editorial). Es un conjunto de entrevistas muy clarificadoras a importantes físicos cuánticos, tales como Wheeler, Bell, Bohm, etc.

J. S. BELL, "Lo decible y lo indecible en mecánica cuántica" (Alianza Universidad). Libro que recoge los trabajos fundamentales de uno de los físicos cuánticos más incisivos y brillantes. Algunos trabajos son bastante técnicos, pero muchos de ellos pueden ser razonablemente seguidos por no expertos.

b) De Bohr o sobre él

N. BOHR, "La teoría atómica y la descripción de la naturaleza" (Alianza Universidad). Una de las obras básicas de Bohr, donde expone sus ideas sobre la realidad física.

A. PAIS, "Niels Bohr's times" (Clarendon Press, Oxford). Es un excelente estudio sobre la vida y la obra de Bohr.

c) Cosmología cuántica

J. J. HALLIWELL, "Cosmología cuántica y creación del universo", en Investigación y Ciencia, febrero de 1992.

Además sobre la evolución histórica de las ideas de Einstein en el campo de la mecánica estadística cuántica:

L. NAVARRO, "Einstein profeta y hereje" (Editorial Tusquets)