
Interpretación actual de la teoría cuántica: de los muchos universos a las historias consistentes

José L. Sánchez Gómez

Arbor CLXVII, 659-660 (Noviembre-Diciembre 2000), 475-488 pp.

Se exponen las razones para la búsqueda de una interpretación de la teoría cuántica que resuelva los problemas de la «ortodoxa» (interpretación de Copenhague), en particular el de la necesidad de postular la existencia de ciertos entes no cuánticos, los observadores. A tal fin, se presentan las líneas esenciales de la interpretación de los muchos-universos y de la moderna formulación de la mecánica cuántica en términos de historias consistentes, haciendo énfasis en el interés de esta última en cosmología cuántica.

Introducción. Los problemas de la ortodoxia

Después de que von Neumann, en su famoso libro de 1932¹, cimentará la entonces reciente mecánica cuántica en el aspecto matemático formal y, sobre todo, de que Bohr, Heisenberg, Born, etc., establecieran las bases de la interpretación física y, de algún modo, incluso filosófica de esta teoría, parecía que todo (al menos desde el punto de vista fundamental) estaba hecho. Sin embargo, la historia posterior ha demostrado que esto no era así. La interpretación de la teoría cuántica desarrollada, principalmente, por Bohr y Heisenberg, conocida como «Interpretación de Copenhague», y hasta prácticamente hoy día considerada como la «ortodoxa», tenía —tiene— un grave inconveniente: requiere la existencia de

observadores que siguen las leyes clásicas, sin que su, digamos, funcionamiento pueda, por hipótesis, deducirse de la teoría cuántica.*

Según Bohr la existencia a priori (una postura de alguna manera neokantiana) de un substrato clásico es imprescindible para la mera comunicación intersubjetiva de los resultados de cualquier tipo de experiencia a escala atómica, si bien a fin de descubrir las leyes que rigen ese mundo atómico haya que introducir el formalismo cuántico. El pensamiento de Bohr se resume con bastante precisión en su famoso principio de complementariedad, según el cual la descripción espacio-temporal y la imposición de la causalidad, que, en conjunto, constituyen el marco de la física clásica, no pueden darse simultáneamente, es decir, no pueden aplicarse a la vez a un fenómeno microscópico (cuántico), sino que proporcionan visiones complementarias del mismo. En palabras de Bohr, en el Congreso Internacional de Física de Como (1927).

La misma naturaleza de la teoría cuántica nos fuerza a considerar la coordinación espacio-temporal y el requisito de causalidad, cuya unión caracteriza las teorías clásicas, como aspectos complementarios pero exclusivos de la descripción que simboliza la idealización de observación y definición, respectivamente.

Bohr incluso creía que este principio era aplicaba más allá de las fronteras de la física atómica, llegando a los dominios de la biología e incluso de la psicología. Así, en un artículo de 1931 («Light and Life», *Nature* 131, 421) se lee:

... Si tratamos de investigar los órganos de un animal hasta el punto de poder llegar a describir el papel desempeñado por los átomos en funciones vitales, indudablemente hemos de matar ese animal... Según este punto de vista, la existencia de vida puede considerarse como un hecho elemental que no puede explicarse, sino que ha de tomarse como un punto de partida en biología, de modo similar al modo en que el cuanto de acción —que aparece como un elemento irracional desde el punto de vista de la física clásica— junto con la existencia de partículas elementales, constituye el fundamento de la física atómica.

La «filosofía» de la escuela de Copenhague se impuso a partir de la década de los años treinta. La razón principal de ello fue que, desde un pun-

(*) La interpretación de Copenhague no es un conjunto de axiomas rigurosamente establecido sino, más bien, una idea general de cómo ha de entenderse y aplicarse la mecánica cuántica. Para un análisis detallado de esta interpretación, véase, por ejemplo, (2).

to de vista pragmático, este modo de ver la mecánica cuántica resulta perfectamente adecuado para la aplicación de dicha teoría al estudio de la física del microcosmos, que fue en definitiva lo que motivó su creación. Es cierto que ya desde la década de los años treinta hubo grandes físicos a quienes no satisfacía completamente la teoría cuántica (Einstein, Schrödinger, etc.), pero sus objeciones no fueron tomadas demasiado en serio debido al enorme avance que registró la física «microscópica», desde el estudio de átomos y moléculas hasta el de las partículas elementales, tras la aplicación de la mecánica cuántica (por no citar el espectacular desarrollo de tipo más práctico como puede ser el de la física del estado sólido).

No obstante la general despreocupación sobre los aspectos de interpretación de la teoría cuántica, había un punto que suscitaba bastante controversia: la cuestión de la medida en mecánica cuántica. Como es sabido, la estricta aplicación del formalismo cuántico a la descripción de un proceso de medida de una propiedad de un sistema microscópico mediante un aparato (macroscópico por definición) conduce a la predicción de estados de este último que no tienen realidad macroscópica, es decir, no se realizan como estados con posibilidad de percepción; el ejemplo —en forma de «parábola»— más conocido es el del «gato de Schrödinger», que, según la mecánica cuántica, estaría en una superposición de gato muerto y gato vivo inexistente en nuestro mundo (y, por supuesto, en el de los gatos). Para precisar esto más, consideremos la siguiente situación:

Un sistema cerrado consta de los dos estados microscópicos correspondientes a la proyección del espín de un electrón (+1/2, -1/2, en unidades \hbar) sobre un determinado eje, digamos el eje z, y un aparato macroscópico que determina el valor de dicha proyección. Sean los estados de espín Z_+ , Z_- , y consideremos un modelo muy simplificado de aparato con sólo dos estados A_0 , A_1 , de modo que la interacción sistema-aparato es:

$$Z_+A_0 \rightarrow Z_+A_0, Z_-A_0 \rightarrow Z_-A_1 \quad (1)$$

Esto representa de manera muy esquemática una medida ideal de primera especie, pues el estado final del aparato determina el valor de la proyección del espín del electrón (el aparato se prepara inicialmente en el estado A_0 y éste es *macroscópicamente* distinguible del A_1). Hasta aquí todo es normal; el problema surge cuando el estado inicial del electrón es una superposición de los anteriores. Por ejemplo, el estado de un electrón cuya proyección de espín sobre el eje x es +1/2 es el siguiente:

$$X_+ = \alpha Z_+ + \beta Z_- , \text{ con } |\alpha|^2 = |\beta|^2 = 1/2 \quad (2)$$

Tras la interacción con el aparato, el estado total sistema-aparato es

$$\psi = \alpha Z_+ A_0 + \beta Z_- A_1 \quad (3)$$

el cual no representa un estado macroscópico definido del aparato (es lo equivalente al estado superposición de gato vivo y gato muerto referido más arriba).

El problema radica en que si el sistema total es cerrado, como se ha supuesto desde el principio, la reducción de ese estado a uno en que el aparato «señale» un valor concreto no es posible en el formalismo estricto de la mecánica cuántica. La solución ortodoxa hace intervenir el proceso de observación, y con éste —de uno u otro modo— a un observador como agente de dicha reducción (en este ejemplo concreto, tras el proceso de observación se obtendría uno u otro de los valores $+1/2$ y $-1/2$ de las proyecciones del espín junto a la correspondiente «posición» macroscópica del aparato, ambos con probabilidad $1/2$). Pero esto sitúa el proceso de observación más allá del formalismo estricto de la mecánica cuántica, lo que choca frontalmente con cualquier pretensión de universalidad de la misma.

Universalidad de la teoría cuántica... pero multiplicidad de universos

En 1956-57, Hugh Everett, estudiante postgraduado de J.A. Wheeler, presentó, en su tesis doctoral, una nueva interpretación de la teoría cuántica, en cierto sentido bastante revolucionaria y al mismo tiempo, paradójicamente, ultraortodoxa³. Una recopilación de trabajos sobre esta interpretación se encuentra en⁴; los aspectos esenciales de la génesis y avatares de la misma pueden verse en un artículo publicado hace unos años en esta revista⁵.

La idea clave en la formulación de Everett es que la mecánica cuántica es una teoría completa y universal, es decir, no hay un mundo clásico que no pueda explicarse en términos de la teoría cuántica y, por tanto, ésta es aplicable a la totalidad del universo.

En consecuencia, afirma Everett, no es necesario postular la existencia de procesos (medida u observación) y/o entes (observadores) cuyo comportamiento escape de la linealidad cuántica (en otras palabras, aunque no las empleadas por Everett, toda la realidad es interpretable en el marco del espacio de Hilbert). Más aún, Everett aseguraba que el forma-

lismo matemático de la mecánica cuántica proporciona una única interpretación de la misma, en el sentido, por ejemplo, de que no es necesario, como hizo Max Born, *postular* la interpretación probabilística de la función de ondas, sino que dicha interpretación puede *deducirse* —y es la única ` posible— del formalismo matemático de la mecánica cuántica elaborado esencialmente por von Neumann. En esto Everett se equivocaba, pues si bien es verdad que la interpretación probabilística es —por supuesto— compatible con dicho formalismo y es plausible que sea la única interpretación «razonable» en la línea del mismo, no es cierto que pueda deducirse matemáticamente sólo a partir de éste (véase⁶ para más detalles). No obstante, esto no es uno de los mayores inconvenientes de la teoría de Everett, o de su extensión debida a DeWitt; como veremos más adelante, las principales limitaciones de esta interpretación no son de orden formal sino que provienen, sobre todo, de su incapacidad de establecer adecuadamente el límite clásico de la mecánica cuántica.

Si se quiere ser riguroso desde el punto de vista histórico, debe puntualizarse que Everett no empleó la denominación de «muchos universos» para su teoría, sino que la llamó interpretación de los estados relativos. Fue B. DeWitt, años más tarde (1967), quien primero se dio perfecta cuenta de las implicaciones de esta interpretación en el campo de la cosmología (si bien, para ser justos, hay que decir que Wheeler ya había hecho algunos comentarios al respecto) y el que introdujo la denominación de «muchos universos» (*many-worlds*), que es la generalmente empleada en la actualidad.

Para entender en lo esencial la interpretación de los muchos universos, es conveniente fijar nuestra atención en la ecuación (3) y recordar que el estado ψ no representa ningún tipo de realidad macroscópica, a pesar de que el aparato de medida es un sistema macroscópico. Como ya se ha comentado, la solución «ortodoxa» de este problema invoca el postulado de reducción, al cual sitúa fuera del formalismo matemático de la mecánica cuántica. Pero para Everett-DeWitt y sus seguidores el formalismo cuántico es universal y completo, así que no cabe hablar de postulados extra. Por lo tanto, en esta nueva interpretación, los dos componentes de ψ poseen realidad, lo que ocurre es que se realizan —«a la vez»— en universos distintos**. Como cualquier proceso de medida en general crea varias bifurcaciones de un estado original, estos «universos» se multiplican constantemente mediante dichas bifurcaciones. El aparato y el observador, que en esta interpretación son meros objetos cuánti-

(**) En lo que sigue, nos referiremos a la versión de DeWitt, que, como ya se ha dicho, es la que puede denominarse apropiadamente «interpretación de los muchos universos».

cos, también se dividen, de modo que cada «copia» del primero registra un único resultado, que es el que observa el segundo. La primera objeción que se le ocurre a cualquiera es que todo esto es mera palabrería pues nadie siente que su personalidad se esté fragmentando continuamente, pero esta objeción tiene una fácil respuesta, puesto que, como hizo ver ya Everett, el propio formalismo cuántico prohíbe la comunicación —salvo casos excepcionales de experimentos de «recoherencia» (Ojo! no decoherencia sino lo opuesto)— entre universos distintos, por lo que no podemos ser conscientes de la existencia de otras copias de nuestro «yo». Debe recalarse que esta interpretación es estrictamente materialista, pues en ella la «consciencia» es un proceso puramente material describable, al menos en principio, en términos mecánico-cuánticos; en otras palabras, el observador es un mero autómatas (con memoria) regido por las leyes cuánticas.

Llegados a este punto, parece natural preguntarse si existe alguna diferencia *empírica*, es decir verificable experimentalmente, entre esta interpretación y la «ortodoxa» (o Int. de Copenhague). Hay que insistir en lo de empírica, porque aunque hemos visto que sí hay diferencias conceptuales, muchos físicos estiman que eso es «mera filosofía». Pues bien, en principio parece posible diseñar algún experimento que distinguiera, a través de sus resultados, entre ambas interpretaciones. Por ejemplo, David Deutsch ha propuesto un experimento de este tipo⁷, que consiste básicamente en un superordenador cuántico cuyos estados de memoria, después de sufrir la fragmentación tras un proceso de tipo medición, podrían fusionarse de nuevo pero dejando constancia de que estuvieron temporalmente separados. Según la interpretación ortodoxa, tal fusión no es posible. Desgraciadamente el experimento de Deutsch pertenece al dominio de la futurología, pues no existe —y probablemente no existirá en los próximos años— un ordenador de esas características. En cualquier caso, el experimento «cuasi-ideal» de Deutsch no contradice el formalismo de la mecánica cuántica y prueba que es posible distinguir dos interpretaciones distintas de esta teoría aunque ambas se ajusten a la parte del formalismo cuántico verificado, por ahora, experimentalmente. (Una descripción simplificada de este experimento, pero que contiene lo esencial del mismo, puede verse en el capítulo dedicado a Deutsch en⁸.)

Aunque muy poco intuitiva, la interpretación de los muchos mundos tiene ciertos aspectos bastante satisfactorios, en particular si se acepta que la teoría cuántica es universalmente válida. En esta manera de entender dicha teoría se elimina la necesidad del postulado de proyección (reducción del paquete de ondas), ajeno al formalismo lineal de la misma. En palabras de Everett³: «una función de onda que obedece en todo mo-

mento y en todo lugar una ecuación de ondas lineal (Schrödinger) proporciona un modelo matemático completo para todo sistema físico aislado sin excepción». La extensión de esta idea al sistema aislado (cerrado) por antonomasia, el universo, se debe —como ya se ha dicho— a DeWitt, y su consecuencia más importante es la llamada ecuación de Wheeler-DeWitt, pieza clave de la cosmología cuántica, sobre la que se tratará al final de este trabajo.

Hasta aquí las ventajas de la interpretación de los muchos-universos (o muchos-mundos), pero ¿qué decir de sus inconvenientes, o, mejor, de sus limitaciones?

La mayor de ellas tiene que ver con la cuestión de la probabilidad, de lo cual ya se ha comentado algo más arriba. Fijemos de nuevo nuestra atención en la ec. (3). Hemos dicho que $|\alpha|^2$, $|\beta|^2$ representan probabilidades, pero deben ser probabilidades «de algo», es decir, de algo que tiene lugar (o de ser algo). Ahora bien, en la interpretación de los muchos-universos, no existe nada de lo que cualquiera de estas cantidades pueda ser, a priori, la probabilidad. La salida tradicional de esta dificultad de los partidarios de esta interpretación consiste en atribuir significado *físico* a la descomposición de la función de onda en varios términos, afirmando que las medidas causan la bifurcación del universo. Pero entonces nos encontramos de nuevo con la dificultad que tiene que afrontar la interpretación de Copenhague: ¿qué diferencia *físicamente* una medida de cualquier otra interacción? ¿Cuándo ocurre realmente la bifurcación? Más aún: ¿cuál es el significado físico de la bifurcación? ¿Se bifurca también el espacio-tiempo? El análisis detallado de estas cuestiones nos llevaría demasiado lejos; basta, pues, con comentar que no han encontrado una respuesta satisfactoria. (Por ejemplo, Squires⁹ introduce la idea de una «conciencia universal», o, en otras palabras una «naturaleza universal de la consciencia», con lo que consigue explicar consistentemente la bifurcación, pero el precio es la introducción de algo no-físico, la consciencia.).

La dificultad mencionada puede expresarse, tal vez de modo más físico, diciendo que la interpretación de Everett-DeWitt no describe adecuadamente el límite clásico —la experiencia macroscópica cotidiana— de manera independiente del observador, al tener que introducir una dependencia con respecto a este ente (autómata, si se quiere) de las bifurcaciones de la función de onda. Esto conecta con la otra gran dificultad de dicha interpretación: en ella no es posible formular un procedimiento general para construir la historia (o las historias) de un sistema físico cerrado independientemente de la memoria de un observador. Es principalmente esta cuestión lo que ha motivado el casi general abandono de

esta interpretación —tomada al pie de la letra— y su sustitución por la formulación de «historias consistentes», que, aun siguiendo en parte la «filosofía» de la misma, en el sentido de aceptar la universalidad de la teoría cuántica, se diferencia de ella en algunos aspectos importantes. La formulación de historias consistentes tiene, sobre todo, interés en cosmología cuántica, pues sus diferencias con la interpretación de Copenhague son explícitas únicamente para sistemas cerrados y, como ya hemos dicho, el sistema cerrado por antonomasia es el universo.

Las ideas esenciales de la formulación de historias consistentes se presentan en la siguiente sección. No se discutirán prácticamente los aspectos técnicos, pues un tratamiento medianamente adecuado de los mismos iría más allá del alcance y de la motivación de este trabajo.

Historias cuánticas consistentes

Como acaba de señalarse, la formulación de la teoría cuántica en términos de historias consistentes puede considerarse, en cierto modo, como una reformulación de la interpretación de los muchos universos que pretende superar los inconvenientes de ésta.

Dicha formulación fue introducida por Griffiths en 1984 (*J. Stat. Phys.* **36**, 219) y «redescubierta», en un formalismo distinto pero con análoga filosofía, por Omnés en 1988 (*J. Stat. Phys.* **53**, 893); una buena descripción de esta formulación se encuentra en¹⁰. Quienes se dieron cuenta primero de su alcance, más allá de lo puramente formal, y en particular de su relevancia en cosmología cuántica, fueron Gell-Mann y Hartle¹¹; aquí seguiremos el punto de vista de estos autores.

Ya se ha comentado al final de la sección anterior que no introduciremos detalles técnicos. Esto tiene la ventaja —es de suponer— de una mayor facilidad de lectura para el no especialista (que, de hecho, es lo que se pretende en este ensayo), pero tiene asimismo el inconveniente —para el que escribe— de tener que expresar en palabras conceptos a veces bastante abstrusos que podrían «despacharse» con unas cuantas expresiones matemáticas. Bueno, intentémoslo.

Ante todo, ¿qué es una historia cuántica? Consideremos un sistema físico *cerrado* del que se supone conocemos su estado cuántico «inicial» y la dinámica que lo rige (el hamiltoniano del sistema). Pretendemos describir la evolución de dicho sistema de manera objetiva, haciendo «preguntas» sobre propiedades del mismo. En términos matemáticos (¡perdón!) dichas preguntas representan operadores de proyección (proyectores, en breve) y, formuladas adecuadamente, proporcionarían (sus respuestas)

una descripción completa del sistema físico en cuestión. El punto fundamental es que cuando estas preguntas vienen descritas por proyectores «puros», o, en otras palabras, cuando se pretende conseguir la máxima información posible del sistema compatible con el formalismo cuántico (esto es, con la debida consideración a Heisenberg y Bohr), entonces las historias así obtenidas no son consistentes. Y ahora viene lo esencial: un conjunto de historias es consistente si a cada una de ellas puede asignársele, de manera matemáticamente precisa, una probabilidad y, para conseguir esto, es absolutamente imprescindible perder información sobre el sistema, mediante un proceso que se conoce técnicamente como «coarse graining», que, en esencia, fue introducido por Boltzmann y Gibbs en sus estudios sobre la irreversibilidad en mecánica estadística.

En la formulación que estamos discutiendo, puede introducirse con precisión matemática el concepto de historias consistentes, a partir del mencionado proceso de «coarse graining» (perdida de información mediante promedios sobre historias «finas» o «individuales») y con la ayuda de la importante propiedad de la *decoherencia*. En el espíritu de este artículo, no podemos formular adecuadamente esta propiedad, basta decir que tiene que ver con el mecanismo de eliminación de las sutiles correlaciones cuánticas que permiten estados «extraños» como el gato vivo—muerto (o ni vivo ni muerto, sino todo lo contrario) de Schrödinger. Lo que sí se debe tener en cuenta, aunque al no demostrarlo requiere un acto de fe, es que propiedad de decoherencia tiene que ver tanto con la dinámica del sistema como con las condiciones iniciales del mismo, algo fundamental en cosmología cuántica, como se verá más adelante. Una introducción —no muy complicada técnicamente— a la idea de decoherencia y su aplicación en el marco de la formulación de historias puede verse en¹².

Las ideas básicas de la formulación de historias consistentes, particularmente en lo referente a sus implicaciones en cosmología cuántica, vienen adecuadamente expresadas por Gell-Mann y Hartle en la introducción de uno de sus primeros trabajos (11) sobre este tema. Con respecto a la motivación para una nueva formulación (la de historias) de la teoría cuántica y del alcance de aquélla, escriben estos autores:

... Esbozamos un esquema mecánico-cuántico para el universo en su totalidad. En el marco de ese esquema, proponemos un programa para describir el origen definitivo en cosmología cuántica del dominio «cuasi-clásico» de la experiencia cotidiana, así como para caracterizar el proceso de medición. Las predicciones en mecánica cuántica se hacen a partir de probabilidades para conjuntos de historias alternativas. Sólo pueden asignarse

probabilidades (en el sentido de) que obedezcan aproximadamente (en la práctica) las reglas de la teoría de la probabilidad a conjuntos de historias aproximadamente decoherentes...

La decoherencia requiere una descripción suficientemente «coarse grained» («de grano grueso») de historias alternativas del universo...

Un dominio cuasiclásico emerge del universo como consecuencia de las condiciones iniciales y de la función de acción de las partículas elementales. Una cuestión importante es si todos los dominios cuasiclásicos son más o menos equivalentes o si (por el contrario) existen varios de ellos no equivalentes esencialmente...

Un «observador» (o recolector y utilizador de información) es un sistema adaptativo complejo que ha evolucionado para explotar un dominio cuasiclásico o, mejor, un conjunto de tales dominios entre los que no puede discriminarse a causa de su propio «coarse graining». Sugerimos que la resolución de muchos de los problemas de interpretación que presenta la teoría cuántica se logra... mediante un examen de las historias alternativas del universo, originadas a partir de su condición inicial, y de un estudio del problema de los dominios cuasiclásicos.

Notemos cómo Gell-Mann y Hartle hacen énfasis en la necesidad de explicar el mundo clásico (más apropiadamente, cuasiclásico) de la experiencia cotidiana sin requerir la existencia de elementos ajenos a la teoría cuántica («observadores»). Puntualizan también que dicho mundo (o tal vez mundos) cuasiclásico viene descrito mediante historias decoherentes a las que puede —al menos aproximadamente— asignárseles probabilidades, y que para la emergencia de tales dominios cuasiclásicos han de cumplirse ciertas condiciones sobre la función de acción de las partículas elementales, cuyo estudio se aborda en las Teorías de Gran Unificación y en la teoría actual de Supercuerdas, así como sobre las condiciones iniciales del universo, tema éste que compete a la cosmología cuántica, y sobre el que diremos algo al final.

Antes de acabar con lo relativo a la formulación de historias consistentes, parece conveniente un breve comentario acerca de los logros y perspectivas de la misma. Su logro más sólido es haber introducido un método matemáticamente acuado —al menos en principio— para abordar la evolución dinámica de sistemas cerrados en el marco estricto del formalismo cuántico, sin necesidad de ningún postulado extra. Su mayor dificultad, que lógicamente constituye un tema prioritario de investigación entre quienes se dedican a estos menesteres, es la construcción de las historias consistentes de un sistema cerrado dado en función de su estado inicial y supuesto conocido el operador hamiltoniano del mismo. Existen diversos modelos basados en diferentes mecanismos dinámicos,

pero ninguno de ellos presenta un procedimiento matemáticamente preciso y *objetivo* de decoherencia. Por objetivo ha de entenderse que el «*coarse graining*» correspondiente no dependa del observador (lo que en términos técnicos se conoce como el problema de la base preferida).

Elementos de cosmología cuántica: aspectos básicos

Si se acepta que la teoría cuántica proporciona el marco fundamental de las leyes de la física, debe concluirse que ha de existir una descripción del universo en su totalidad en términos cuánticos, es decir, debe haber una «*función de ondas del universo*». Por supuesto, hay que entender que no se trata de una descripción pormenorizada del universo, algo que está muy fuera del alcance de nuestro poder de computación (y que, además, no tendría mucho sentido), sino de las propiedades estructurales del mismo, en particular del tipo de condiciones iniciales que hacen posible la existencia de un universo como el nuestro (cuasiclásico) a partir de una estructura puramente cuántica. Esto constituye el tema central de la cosmología cuántica.

Para una descripción del tipo que acaba de apuntarse, se precisan tres clases de información: la función de acción de las partículas elementales, el estado cuántico inicial del universo y, como la mecánica cuántica es una teoría probabilística, toda la información obtenible a partir de nuestra historia específica (en nuestro universo observable cuasiclásico).

No se tratará aquí de la primera clase de información. Como ya se ha apuntado más arriba, esto compete a la física de partículas elementales, cuyo principal objetivo en la actualidad es encontrar una teoría básica unificadora de las interacciones fundamentales. Con respecto a la segunda clase, la referente al estado cuántico inicial del universo, resulta curioso que, según la cosmología cuántica, probablemente esté relacionada con la primera: un funcional único de acción podría tal vez describir a la vez la interacción fundamental de las partículas y el estado inicial del universo (por ahora, esto es casi puramente especulativo).

En los últimos años ha tenido lugar un significativo avance en la comprensión de las propiedades del universo a escala cosmológica; debido en parte a este progreso, ha aumentado asimismo el nivel de investigación sobre las condiciones iniciales del mismo. Las observaciones de sistemas extragalácticos situados prácticamente en los confines del universo observable, así como la determinación muy precisa de las propiedades de la radiación cósmica de fondo (por ejemplo, mediante las medidas del satélite COBE en los primeros años noventa o las más recientes del telesco-

pio BOOMERANG) han suministrado una información muy valiosa sobre la estructura del universo a gran escala y, como consecuencia, sobre la naturaleza —geometría— del espacio-tiempo. Así, el análisis de datos recientes del BOOMERANG permite afirmar con cierta seguridad que el espacio-tiempo es plano, esto es, su curvatura es nula y, por consiguiente, el universo se expande indefinidamente. Esta información podría sistematizarse en su conjunto en una ley —probablemente simple— acerca de las condiciones iniciales, objetivo principal de la cosmología cuántica.

La mayor dificultad de la cosmología cuántica, que aparece ya en su misma formulación como teoría, radica en el tratamiento adecuado del campo gravitacional. Surge de modo natural e inmediato la cuestión de si hay que cuantizar la gravedad y, por consiguiente, el espacio-tiempo (en Relatividad General ambas cosas están unidas). Según los creadores de la teoría cuántica, particularmente Niels Bohr, la respuesta sería negativa, pues el espacio-tiempo proporciona finalmente el soporte clásico, que constituye el referente de nuestras experiencias y la posibilidad de su comunicación intersubjetiva. Pero esto, la no cuantización del campo gravitacional, presenta una dificultad a primera vista insuperable: si se admite, como parece confirmar el experimento, que la teoría cuántica proporciona las leyes fundamentales de la materia y que el campo gravitacional se rige por las ecuaciones de Einstein (Relatividad General), la asignación de una naturaleza final clásica a dicho campo nos llevaría a una contradicción. Esto puede verse, a grandes rasgos, con relativa facilidad: las ecuaciones de Einstein pueden escribirse como $G_{\mu\nu} = kT_{\mu\nu}$, donde el primer miembro —tensor de Einstein— se relaciona con la geometría del espacio-tiempo y por tanto con la gravitación, mientras que el segundo representa la densidad de energía (materia-energía, si se quiere) y se forma con los campos fundamentales (quarks, leptones, fotón, etc.). Como este último es un operador cuántico, también ha de serlo el primero, con lo que llegamos a la necesidad de cuantizar el campo gravitacional. Podría pensarse que hay todavía una vía de escape, escribiendo el segundo miembro como valor medio del correspondiente operador cuántico, pero esto (teoría semiclásica de la gravitación) conduce a inconsistencias, tales como la posibilidad de comunicación superlumínica.

Admitiendo entonces que la gravitación debe cuantizarse, la cuestión es cómo. Sería del todo inapropiado —y pretencioso— presentar aquí las líneas de investigación (realmente en estado no muy avanzado) desarrolladas a tal fin, pero sí debe recalcar que sin una teoría cuántica de la gravitación resulta imposible llevar completamente a cabo el programa de la cosmología cuántica. Afortunadamente, conocemos —o creemos conocer— algunos aspectos básicos que habría de tener una teoría cuánti-

ca de la gravitación adecuada y, ya con eso, podemos plantear una cuestión fundamental que tal vez pueda resolverse con el nivel de conocimiento de la cosmología cuántica actual: ¿cómo, en el marco de la gravitación cuántica, el campo gravitacional deviene (cuasi) clásico?. En otras palabras, ¿cómo surge el espacio-tiempo de nuestra experiencia cotidiana a partir del estado cuántico primigenio del universo?

Como es fácilmente imaginable, no se conoce la respuesta precisa a esta cuestión; no obstante, mediante la formulación de historias consistentes, resulta al menos posible disponer de un marco adecuado para encontrarla, lo que parece inimaginable en el contexto de la interpretación de Copenhague. La emergencia de un tipo usual de comportamiento (cuasi) clásico de los sistemas macroscópicos a partir de las leyes cuánticas fundamentales es un asunto de indiscutible relevancia en la cosmología del universo primitivo. Así, por ejemplo, en el modelo inflacionario del universo, cuya credibilidad ha aumentado tras las observaciones del COBE y del BOOMERANG mencionadas más arriba, las fluctuaciones clásicas de la densidad de materia-energía requeridas para la formación de las galaxias se originan a partir de las fluctuaciones cuánticas de un campo escalar, enormemente amplificadas por la inflación. De alguna manera, esto proporciona un ejemplo extremo de un proceso cuántico de «medida», en el sentido de que la estructura del universo a gran escala que observamos actualmente es una especie de «aguja» que habría registrado permanentemente el estado cuántico del campo escalar (campo «inflacionario») en el origen del tiempo.

Cuando se abordan estas cuestiones básicas, aparece la necesidad de disponer de una formulación rigurosa de la teoría cuántica que pueda aplicarse sistemática y coherentemente a sistemas cerrados. En principio la tenemos: la formulación de historias consistentes. La tarea ahora consiste en desarrollarla al máximo, resolviendo las dificultades matemáticas (y también algunas conceptuales) nada triviales que surgen en su aplicación, sobre todo en cosmología cuántica.

Referencias

¹ J. VON NEUMANN. *Fundamentos matemáticos de la mecánica cuántica* (CSIC, Madrid, 1994). Facsimil de la primera edición española de 1949 traducida de la edición alemana por R. ORTIZ FORNAGUERA, con Introducción de J. M. SÁNCHEZ RON.

² H. P. STAPP. «The Copenhagen Interpretation», *Am. J. Phys.* **40**, 1089 (1972).

³ H. EVERETT. «Relative State Formulation of Quantum Mechanics», *Rev. Mod. Phys.* **29**, 454 (1957).

⁴ B. S. DEWITT y N. GRAHAM (eds.). *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*, (Princeton University Press, Princeton, N. J., 1973).

- ⁵ A. CASSINELLO. «La interpretación de los muchos universos de la mecánica cuántica. Apuntes históricos», *Arbor* **CXLVIII**, 47 (1994).
- ⁶ A. CASSINELLO y J. L. SÁNCHEZ-GÓMEZ. «On the Probabilistic Interpretation of Quantum Mechanics», *Found. Phys.* **26**, 357 (1996).
- ⁷ D. DEUTSCH. «Quantum Theory as a Universal Physical Theory», *Int. J. Theor. Phys.* **24**, 32 (1985).
- ⁸ *El espíritu en el átomo. Una discusión sobre los misterios de la física cuántica*. P. C. DAVIES y J. R. BROWN, eds. (Alianza Editorial, Madrid, 1989).
- ⁹ E. J. SQUIRES. «An Attempt to Understand the Many-Worlds Interpretation of Quantum Theory», en *Quantum Theory Without Reduction*. M. Cini y J. M. Levy-Leblond, eds. (Adam-Hilger, Bristol, 1989).
- ¹⁰ R. OMNÉS. *The Interpretation of Quantum Mechanics* (Princeton University Press, Princeton, N.J., 1994).
- ¹¹ M. GELL-MANN y J. B. HARTLE. «Quantum Mechanics in the Light of Quantum Cosmology», en *Complexity, Entropy and the Physics of Information*. W. H. ZUREK, ed. (Addison-Wesley, Nueva York, 1991).
- ¹² J. L. SANCHEZ GOMEZ. «Decoherencia: aspectos generales y aplicación a la cosmología cuántica», en *Fundamentos de física cuántica*. A. F. Rañada et al., eds. (Editorial Complutense, Madrid 1996).