



Universidad de Valladolid

**La interpretación de los Muchos Mundos
(de Everett) de la Mecánica Cuántica:
implicaciones filosóficas**

TRABAJO FIN DE GRADO

Autora: Sara Blanco Peña

Tutor: Adán Sus Durán



Facultad de Filosofía y Letras
Grado en Filosofía

Índice

1. Introducción	1
2. Qué es y cómo surge la Mecánica Cuántica.....	4
2.1. La ecuación de Schrödinger.....	6
2.2. El planteamiento de Heisenberg	7
2.3. El problema de la medida	9
3. Interpretaciones	13
4. La interpretación de Everett	16
5. Muchos Mundos.....	19
6. Muchas Mentes	23
7. Crítica a la interpretación de los Muchos Mundos.....	25
7.1. El problema de la base privilegiada.....	25
7.2. La naturaleza de los mundos.....	26
7.3. El problema de la probabilidad.....	28
7.4. Falsabilidad.....	31
8. Implicaciones filosóficas.....	32
Bibliografía.....	37

1. Introducción

El presente trabajo tiene por objeto explorar algunas de las cuestiones que la mecánica cuántica puso sobre la mesa a lo largo del siglo XX y que resultan de especial interés desde un punto de vista filosófico. Nos centraremos en la interpretación de Hugh Everett de esta teoría física y de las hipótesis subsiguientes que le han seguido. Para ello, comenzaremos presentando el contexto histórico que envolvía a la física en los siglos XIX y XX, así como algunas nociones teóricas que serán fundamentales para nuestro desarrollo posterior. Estamos ante un periodo de ebullición que dio lugar a una gran producción de teorías y nuevos descubrimientos en los que se entrelazan varias disciplinas. Se ha tratado de seleccionar sólo aquellos cuya relevancia es crucial para el nacimiento de la mecánica cuántica, y que nos ayudarán a comprender algunas de las controversias que introduciremos más adelante.

A continuación esbozaremos de forma breve algunas de las interpretaciones de la mecánica cuántica más relevantes que surgieron a partir de las nociones teóricas presentadas en el segundo capítulo, a saber, la interpretación de Copenhague, las teorías del colapso, la de Bohm y la del propio Everett. Dichas interpretaciones tratan de esclarecer lo que subyace tras la teoría cuántica, cuyo formalismo no deja claro cómo es el mundo de acuerdo con la teoría, sino que simplemente pone sobre la mesa un cierto comportamiento contra intuitivo que nos deja con más preguntas que respuestas. La tarea interpretativa trata de solucionar esto, siendo su objetivo el de ofrecer una explicación satisfactoria sobre a qué responden las leyes cuánticas. El punto de vista everettiano se sitúa tardíamente respecto a las interpretaciones más tradicionales de la cuántica, por lo que es importante conocerlas y situarlas para hacerse a la idea del conocimiento previo que Everett tenía y que le impulsó a desarrollar un enfoque tan particular.

A partir de aquí, pasaremos a adentrarnos en la interpretación de los Muchos Mundos y qué implicaría en el caso de ser cierta. No queda claro en la literatura científica dónde acaba estrictamente el planteamiento de Everett y dónde empieza la reinterpretación del mismo en lo que a los mundos respecta, pues sobre ellos Everett no concreta gran cosa (su ontología, cómo surgen, etc.) que otros autores sí hacen. Aunque dediquemos el capítulo cuarto a esclarecer qué propuso Everett y nada más que eso, y el quinto a ir un poco más allá en la cuestión de los mundos, en principio nos referiremos en este trabajo a la interpretación de los Muchos Mundos y a la interpretación de Everett indistintamente. Se trata de una interpretación bastante exótica, rechazada en su día por Bohr, factor que entre otros conllevó la indiferencia de la mayoría de la comunidad científica en el ecuador del siglo XX. Algunas décadas más tarde, esta interpretación fue rescatada, y tuvo lugar una revalorización de la misma y de su trasfondo. Nombraremos algunas de las reinterpretaciones que se hicieron de la propuesta de Everett, como lo que se conoce como de las Muchas Mentes. Presentaremos aquí sus puntos más relevantes y

los aspectos que la convierten en una teoría lo suficientemente interesante como para ser al menos considerada.

A continuación, procederemos a desarrollar algunas de las críticas más destacadas que se le han hecho a la interpretación de los Muchos Mundos, así como diversos problemas que ésta presenta. Dichos problemas no refutan la interpretación de forma llana, pero sí que nos hacen pensar acerca de las bases sobre las que se fundamenta y hacen que aceptarla sin más sea cuanto menos controvertido. Varias de las críticas de hecho, no cuestionan sólo la interpretación de Everett, sino que señalan problemas más generales que en ocasiones son comunes a toda interpretación. Me parece interesante como, al criticar el planteamiento everettiano, nos damos cuenta de que se le exigen cosas que otras interpretaciones físicas más asentadas tampoco pueden satisfacer. Nos adentramos en este capítulo en debates clásicos en filosofía de la ciencia como qué podemos requerirle a un planteamiento científico para ser aceptado como válido.

Por último concluiremos nuestro recorrido con una sección de implicaciones filosóficas, que trata de subrayar los aspectos más propiamente filosóficos de la interpretación de los Muchos Mundos. Algunas de estas implicaciones se basan en las declaraciones de los físicos que vieron surgir la mecánica cuántica, y otras son de corte algo más personal. En cualquier caso, son reflexiones que pretenden hacernos tomar conciencia sobre el mundo y lo que sabemos de él, algo que la interpretación de los Muchos Mundos pone en cuestión sirviéndose de un elegante formalismo matemático y una ingeniosa forma de afrontar la teoría cuántica.

Se ha escogido la interpretación de los Muchos Mundos como tema de este trabajo porque plantea cuestiones que nos hacen reconsiderar nuestro marco epistemológico, así como debates clásicos en filosofía de la ciencia sobre la relación entre la realidad, los experimentos y las teorías. La mecánica cuántica supone una ruptura con nuestras intuiciones más básicas, y marcó un punto de inflexión en la física. No se trata de una teoría física que dé sin más cuenta del mundo, descubriéndonos una nueva parcela de realidad hasta ahora desconocida; lo que se está poniendo en cuestión es nuestra forma de conocer, poniéndose de manifiesto aspectos del mundo a primera vista incompatibles y sistemas físicos que se comportan de forma contra intuitiva. Ante las tensiones y dilemas que la mecánica cuántica plantea, se hace indispensable una interpretación de la misma que nos haga comprender no sólo cómo funciona el mundo, sino por qué lo percibimos de la forma en que lo hacemos. Se abre así una tarea ardua, en la que se contraponen formas diversas de entender unos resultados ambiguos, que dan lugar a especulación diversa. No hay a día de hoy un consenso universal acerca de cuál es la forma correcta de entender la teoría cuántica. Al no haber una respuesta obvia a los interrogantes que la mecánica cuántica plantea, y poner ésta en cuestión la propia actividad de experimentar, resulta difícil ponerse de acuerdo en por qué los experimentos se comportan cómo se comportan, y qué papel juega en ellos nuestra experiencia. La interpretación de los Muchos Mundos da respuesta a estas preguntas de

forma exitosa, aunque por el camino le surjan problemas y sea posible hacer objeciones diversas. Considero pese a ello que es una interpretación relevante, pues reconcilia la teoría con nuestras experiencias, que era el gran reto de la mecánica cuántica. Everett perfila un mundo en el que sigue habiendo una conexión causal entre la realidad y nuestra percepción de la misma, de forma que los sorprendentes resultados experimentales con los que la física topó en el siglo XX quedarían explicados. A lo largo de este trabajo trataremos de dar cuenta de estas explicaciones, así como del camino argumentativo que nos lleva hasta ellas.

2. Qué es y cómo surge la Mecánica Cuántica

A finales del siglo XIX la física pasaba por una crisis relativa a la unidad de la disciplina. Distintas ramas como la termodinámica o la electrodinámica se disputaban la posición de ser la base fundante de la física, sobre la que el resto de teorías deberían apoyarse. Ya en 1890, en este contexto de crisis, Helm y Ostwald desafían la visión mecanicista que tradicionalmente imperaba con su energética. Según ellos, la energía debía ser el principio base de la física, y no las leyes mecánicas (Kragh, 2007, pp. 7-10). Vemos así, que previo a Planck y Einstein, ya existía un pensamiento no mecanicista (a diferencia de lo que a veces pueda parecer al ofrecer un relato simplista de la historia de la física en estos años).

La mecánica cuántica es una teoría física que aparece a principios del siglo XX como respuesta a la imposibilidad de la física clásica para explicar los resultados de ciertos experimentos. Para comprender el origen de esta teoría hemos de remontarnos al siglo XIX, pues aquí la historia de la física y de la química se entrelazan. Fueron varios los descubrimientos que dieron paso al cambio de mentalidad mencionado en el párrafo anterior, y en último término, al nacimiento de la mecánica cuántica. En 1897 Thomson descubre el electrón tal y como lo conocemos hoy experimentando sobre los rayos catódicos, cuya naturaleza se creía corpuscular (y no etérea); al descubrir en ellos electrones, se extrapoló la presencia de estas partículas a toda la materia, en lugar de verlo como un caso particular de los rayos. Años antes, Ludwig Boltzmann sugiere que los estados de energía de un sistema físico pueden ser discretos. Esta idea será clave para que en 1900 Max Planck desarrolle la hipótesis cuántica de que cualquier sistema atómico que radie energía, al menos en teoría, puede dividirse en elementos discretos de energía (fotones¹). La energía de cada fotón viene definida por $e = h\nu$, donde h es la constante de Planck. En relación a esta idea, Einstein postulará en 1905 que la luz está formada por fotones².

Entre estos acontecimientos clave, destaca que en 1900 Max Planck introduce la idea de que la energía está cuantizada para poder derivar la ley de Planck, que es una fórmula que describe la densidad espectral de la radiación electromagnética emitida por un cuerpo negro en equilibrio térmico en una cierta temperatura T . Esta ley fue muy relevante entre otras cosas por sus aplicaciones a diversos modelos de átomo, como por ejemplo el de Bohr.

Retrospectivamente, suele decirse que la mecánica cuántica nació en 1900 de la mano de Planck, aunque en su momento no parece que ni siquiera el propio Planck fuera consciente de ello. Su ley fue aceptada porque desde el punto de vista empírico era increíblemente satisfactoria, pero a nivel teórico no terminaba de comprenderse bien.

¹ El término *fotón* será acuñado 26 años más tarde por Gilbert N. Lewis.

² Se resuelve así el problema del efecto fotoeléctrico. Por otro lado, el problema del cuerpo negro quedaría zanjado con la hipótesis de Planck.

Planck y un gran número de sus contemporáneos consideraron que las implicaciones de la ley que parecían romper con la física clásica serían corregidas en el futuro.

Pocos años después, Einstein aportará sus propias ideas sobre estas cuestiones, defendiendo la postura de que

la propia radiación tenía una estructura discreta o atomística, una hipótesis que iba mucho más allá de la sugerida por Planck. [...] Einstein era muy consciente de la naturaleza radical de su ‘enfoque heurístico’ de la radiación libre como consistente en cuantos discretos, o como se les denominó más tarde, fotones (Kragh, 2007, p. 66-67).

Al igual que en el caso de Planck, Einstein propuso una hipótesis cuántica para solucionar un problema físico particular (el efecto fotoeléctrico) para el que en principio se esperaba una solución más clásica. Lo que se trataba de comprender, es por qué un material emite electrones si incide sobre él una radiación electromagnética, y por qué lo hace de forma independiente a la intensidad de dicha radiación. Aunque la mecánica cuántica aún no estaba consolidada como tal, se trataba de un efecto cuántico, y en ella residía la respuesta. Así, Einstein descubrió que cada material emite electrones en función de la frecuencia de la radiación que se le aplica (que responde a la ley de Planck) porque la luz está formada por fotones que el material absorbe.

Años más tarde Bohr aplicará estas ideas a su modelo atómico, incorporando en él el concepto de cuantización a fin de subsanar los problemas de estabilidad que presentaba el átomo de Rutherford. Así, Bohr presenta un modelo en el cual los electrones giran en órbitas circulares alrededor del núcleo. Mientras el electrón permanece en su órbita, ni gana ni pierde energía; esto sólo sucede al saltar de una órbita a otra. La novedad del modelo reside en que la energía de estas órbitas debía ser específica, por lo que hay un número máximo de electrones permitidos por cada órbita. Al haber unos ciertos niveles energéticos permitidos en las órbitas, cuando los electrones saltan a órbitas de mayor o menor energía (respecto a la órbita desde la que parten), emiten o absorben respectivamente fotones. De este modo, la ley de Planck vuelve a aparecer, esta vez para regir los intercambios energéticos que se dan dentro del átomo.

Algunos años después, se introducirán en este modelo cambios y matizaciones. Entre 1915 y 1916, en Múnich, Arnold Sommerfeld

introdujo la teoría especial de la relatividad en la mecánica del átomo de Bohr. De esta manera, llegó a un átomo con dos cuantos en el que las órbitas electrónicas se describían con números cuánticos principales y azimutales, y una expresión para la energía que dependía de los dos números cuánticos. De acuerdo con la teoría más

sofisticada de Sommerfeld, existían muchos más estados estacionarios que en la teoría de Bohr de 1913, y esto hacía posible una explicación de la estructura fina (Kragh, 2007, p. 57)

Paschen confirmó experimentalmente en 1916 las suposiciones de Sommerfeld, considerando la mayoría de la comunidad científica “el trabajo de Sommerfeld y Paschen [...] una asombrosa confirmación de la teoría cuántica de los átomos de Bohr” (*ídem*). Es decir, la cuántica volvía a dar respuesta a incógnitas que la física clásica no podía resolver, y poco a poco este tipo de hipótesis iban adquiriendo relevancia y siendo conectadas entre sí. Aunque estos descubrimientos eran acertados, habían sido derivados de hipótesis aisladas; es decir, se basaban en experimentos empíricos y mediciones, pero no había aun una teoría detrás que unificara y explicara estos resultados. La resolución de estos problemas particulares acabará dando forma un corpus teórico que finalmente cristaliza en lo que hoy conocemos como mecánica cuántica.

En 1924 Louis de Broglie expone la idea de dualidad onda corpúsculo (es decir, que hay partículas que en ocasiones, en ciertos experimentos, se comportan como ondas y viceversa). Este planteamiento motiva a Schrödinger a desarrollar su ecuación homónima, que trata de hacer más general la teoría de Broglie, describiendo la evolución de un sistema físico en términos cuánticos. Paralelamente, físicos como Heisenberg, Born y Jordan comienzan a hacer física en clave de matrices³, pues se dan cuenta de que matemáticamente encaja mucho mejor con estas nuevas ideas⁴. Se llega así a dos formulaciones independientes de la misma idea. Procedemos a desarrollar brevemente la formulación de Schrödinger.

2.1. La ecuación de Schrödinger

Llevando las ideas de Broglie al ámbito del modelo atómico se encontró una nueva vía de investigación al respecto, pues hasta el momento la física clásica había fracasado en sus intentos de explicación de la estructura atómica. La ecuación de Schrödinger permite interpretar clásicamente los saltos de los electrones en el modelo atómico de Bohr⁵ (que había llegado a postular que saltaban, pero no a describir el salto) al interpretar los electrones como ondas y los saltos como cambios de frecuencia. De este modo, se descubrió que cuando las ondas están confinadas en una región particular del espacio sólo hay cabida para determinadas longitudes de onda. Si se combina esto con la atracción que existe entre los electrones y el núcleo (negativos y positivo

³ Schrödinger describirá los resultados en términos ondulatorios, descubriendo más adelante que ambas descripciones son equivalentes.

⁴ Al igual que los estados cuánticos, las matrices no conmutan.

⁵ Este modelo se encuentra ya a caballo entre la mecánica clásica y la cuántica, pues Bohr cuantiza el momento angular de cada electrón, de forma que cuando éstos pasan de un nivel a otro emiten energía rigiéndose por la constante de Planck.

respectivamente), resulta la ecuación de Schrödinger: $\hat{H}\Psi = E\Psi$. Ψ representa la función de onda, que describe la evolución de la posición del electrón dentro del átomo. La ecuación de Schrödinger aplica un operador hamiltoniano H sobre dicha función a fin de estudiar el comportamiento del electrón y sus valores energéticos. De este modo, la ecuación permite ver cómo los electrones sólo pueden albergar ciertas cantidades de energía, habiendo un mínimo permitido; de esta forma se evita el problema de los modelos anteriores, pues el electrón no puede perder energía hasta el punto de que su órbita se convierta en una trayectoria espiral hacia el núcleo. Cuando un átomo salta desde uno de sus valores energéticos permitidos hacia su estado de energía mínimo emite un fotón, cuya energía equivale a la diferencia de energía de los dos estados anteriores (Rae, 1986, p. 13-14).

Al margen del tratamiento de la función de onda que desarrolló Schrödinger con su ecuación, Heisenberg trabajará con matrices. Como ya hemos apuntado, más adelante se descubrirá que ambos métodos son equivalentes. Procedemos ahora a exponer brevemente lo fundamental de las ideas aportadas por Heisenberg.

2.2. El planteamiento de Heisenberg

En lugar de interpretar los electrones en el átomo de Bohr como ondas, Heisenberg los entenderá como matrices. Como Schrödinger, Heisenberg también describirá los saltos de los electrones en el tiempo, operando con las matrices que los representan en lugar de usar cambios de frecuencia. Heisenberg destaca por ofrecer la primera formulación matemática completa de la mecánica cuántica, que hasta entonces tan sólo contaba con la teorización de casos particulares. Heisenberg estaba decidido a usar en su formulación únicamente magnitudes observables, es decir, valores que sea posible medir experimentalmente. Desarrolló un lenguaje en el cual la posición de un electrón en $x(t)$ se traducía por $X_{nm}(t)$. $X_{nm}(t)$ es una matriz de n filas y m columnas, de forma que para operar con la posición de un electrón ha de recurrirse a las leyes matriciales y no al álgebra clásica que usaríamos normalmente. Por ejemplo, si deseamos multiplicar nuestra posición $x(t)$ por otra $y(t)$, no bastará con usar la regla de multiplicación habitual, sino que si $X_{nm}(t) = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$ y $Y_{nm}(t) = \begin{pmatrix} a' & b' \\ c' & d' \end{pmatrix}$ ⁶

$$X_{nm}(t) \cdot Y_{nm}(t) = \begin{pmatrix} aa' + bc' & ab' + bd' \\ ca' + dc' & cb' + dd' \end{pmatrix}$$

Es decir, los términos de las filas de la primera matriz se van multiplicando por los términos de las columnas de la segunda matriz. No hay en este método conmutabilidad, de forma que $X_{nm}(t) \cdot Y_{nm}(t)$ no equivale a $Y_{nm}(t) \cdot X_{nm}(t)$. Gracias a Born y a Jordan, pronto se descubrió que las leyes matriciales no eran aplicables sólo a las posiciones de

⁶ Observamos que en este ejemplo concreto, tanto n como m equivalen a 2 (pues hemos escogido matrices de 2×2).

los electrones, sino a todas las magnitudes observables del átomo (el momento, la energía, etc.). Así, la evolución de las partículas subatómicas podía ser completamente descrita usando esta mecánica matricial, del mismo modo que Schrödinger había usado su ecuación homónima para el mismo fin. Ambos métodos fueron desarrollados en 1925, cayendo el de Heisenberg en desuso debido a su complejidad, aunque funcionaba igual de bien que el de Schrödinger.

Dos años más tarde, Heisenberg formula un principio que, aunque no es una ley fundamental, se deduce de los axiomas de la cuántica y resultará especialmente llamativo: el principio de incertidumbre. Dicho principio determina que hay variables complementarias, como la posición y el momento, cuyo valor no podemos conocer al mismo tiempo. Esta idea surge a raíz de experimentos relacionados con la dualidad onda-corpúsculo de la luz de la que hablábamos párrafos atrás, como por ejemplo el experimento de la doble rendija. A continuación procedemos a exponerlo, ya que sus resultados son muy ilustrativos.

El experimento consiste en colocar de forma consecutiva un foco de luz, una placa con una rendija y otra placa con dos rendijas, como muestra la figura 1.

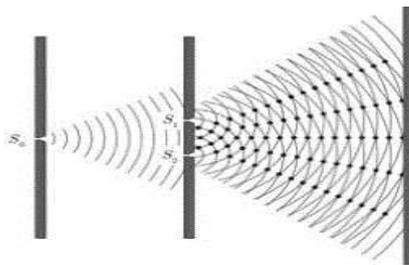


Figura 1

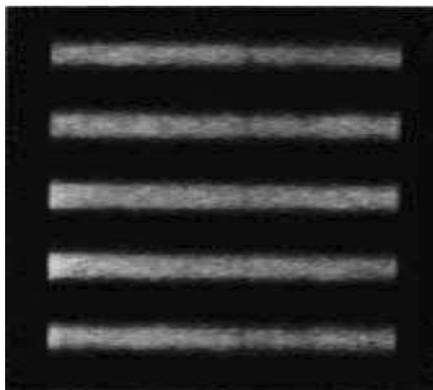


Figura 2

una rendija y otra placa con dos rendijas, como muestra la figura 1. El resultado intuitivo del experimento sería que sobre la pantalla final llegara la luz siguiendo un patrón uniforme (homogéneo)⁷, pero sin embargo, lo que sucede es que se forma un patrón de franjas en las que hay alternativamente luz y oscuridad (figura 2). No podemos entender el resultado del experimento de la doble rendija si nos negamos a ver la luz como una onda, pues el patrón de luz y oscuridad en franjas se debe a la interferencia entre las dos ondas de luz que se forman cuando la primera onda pasa por dos rendijas bifurcándose. Así, en las franjas de luz se da una interferencia constructiva, es decir, coincide valle con valle o cresta con cresta, y en las franjas de oscuridad estamos ante una interferencia destructiva, es decir, coincide el valle de una onda con la cresta de la otra o viceversa, anulándose entre sí.

Si entendemos la naturaleza de la luz como exclusivamente corpuscular, este resultado podría interpretarse como el fruto de la interferencia entre fotones, como si estos

⁷ Tendremos esta intuición si entendemos la luz como formada por partículas, de modo que éstas llegan de forma homogénea a la pantalla ya sean emitidas por un foco o por dos. Si por el contrario partimos de la naturaleza ondulatoria de la luz, esto no tendría desde luego por qué resultarnos intuitivo, pues esperaríamos que se diera el patrón de franjas del mismo modo que se producen interferencias entre dos chorros paralelos de agua en una piscina.

paquetes interactuasen entre sí de alguna forma dando lugar a zonas de oscuridad. Probamos a repetir el experimento haciendo que haya un solo fotón cada vez pasando por la rendija, de forma que no sea posible que haya interacción porque nuestro fotón aislado no tendría nada con lo que interactuar; sin embargo, el patrón se repite. Queda descartada la hipótesis de la interacción entre fotones.

Para explicar este fenómeno, ponemos detectores en ambas rendijas, confirmando que el fotón no pase por las dos al mismo tiempo, sino que si el detector 1 detecta el fotón, no lo hace el detector 2 (lógicamente). Sin embargo, si colocamos un sistema como el de la figura 3 (una placa en movimiento que sólo tapona una rendija cada vez) deja de aparecer el patrón de interferencia. ¿Por qué sucede esto, si de todos modos sólo pasaba un fotón por cada una de las dos rendijas?

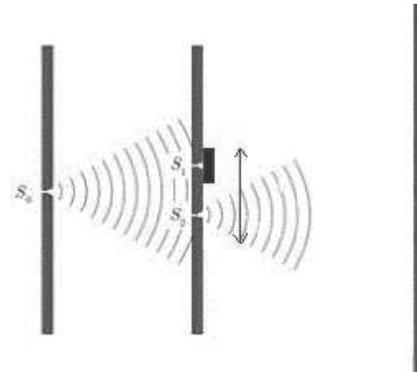


Figura 3

Es como si el fotón se negara a comportarse así si tenemos alguna posibilidad de saber por qué rendija va a pasar. Volviendo al principio de incertidumbre, si entendemos el hecho de saber por qué rendija pasa el fotón como la posición de la partícula, y conocer el patrón de interferencia como análogo al momento, vemos que, como postuló Heisenberg, no podemos conocer ambos datos a la vez; no podemos saber dónde y cuándo estará la partícula al mismo tiempo (o sabemos una cosa, o sabemos la otra).

De este modo, acorde al principio de incertidumbre, cuánta más certeza tenemos sobre la posición de una partícula, menos información tendremos sobre su momento. El momento tiene que ver con la velocidad y la masa de la partícula, por lo que si conocemos estos datos no podremos saber con exactitud dónde está la partícula y viceversa. Este principio está estrechamente relacionado con el problema de la medida, que procedemos a exponer y que será clave para el tema que nos ocupa en este trabajo.

2.3. El problema de la medida

Expondremos este problema usando un ejemplo empírico. Pongamos que tenemos un sistema físico, una partícula, con dos propiedades medibles: su color y su dureza⁸. Cada una de estas dos propiedades tiene dos valores, blanco/negro y duro/blando respectivamente⁹ (D. Albert, 1992, p. 1-17). La experiencia nos dice que es posible

⁸ Tomaremos el ejemplo de Albert extraído de *Quantum Mechanics and Experience* por resultar el razonamiento más ilustrativo con propiedades sencillas como el color y la dureza. Dichas propiedades no se encuentran en las partículas subatómicas, sino que nuestra analogía haría referencia a los valores del espín en los electrones (en lugar de blanco o negro, espín hacia arriba o hacia abajo, por ejemplo).

⁹ Dichas propiedades no mantienen ningún tipo de correlación entre sí. Se ha comprobado empíricamente que, dado un conjunto de electrones blancos (que ya han pasado por el aparato de medida correspondiente que ha determinado que son blancos), si realizamos una medición para determinar su dureza la mitad de

medir con precisión ambas propiedades, se cuenta con la tecnología necesaria y los resultados son exitosos. Sin embargo, a raíz de los experimentos se observa que si conocemos el color de la partícula no podemos conocer su dureza y viceversa (vemos así que estas propiedades funcionan de forma análoga a la posición y al momento de los que hablábamos en párrafos anteriores), lo cual concuerda con el principio de incertidumbre tal y como lo presentamos en el epígrafe anterior. Es decir, si tenemos una partícula que sabemos que es blanca, en el momento en el que medimos su dureza, dejamos de saber que la partícula es blanca. Si un experimento nos permite saber que una partícula blanca es además dura, en cuanto determinamos el dato de que la partícula es dura, el dato de que es blanca se vuelve indeterminado; es decir, tras medir la dureza podríamos volver a medir el color y el resultado no tendría por qué ser blanco, existe la posibilidad de que la partícula sea negra.

Volviendo al experimento de la doble rendija, vemos que el problema de la medida también se hacía patente en él. Si medíamos por qué rendija pasaba el fotón (que podría también ser un electrón por ejemplo, no es un experimento que funcione exclusivamente con luz), el patrón de interferencia dejaba de aparecer, al igual que nuestra partícula dejaba de ser necesariamente blanca una vez que determinamos que es dura. Parece que no es posible determinar los valores de dos propiedades complementarias del sistema a la vez; si determinamos una (midiéndola) la otra permanecerá necesariamente indeterminada, y viceversa.

A raíz de estas observaciones podemos concluir que la dualidad onda-corpúsculo de la luz ilustra una propiedad general de la física cuántica: el sistema físico que estemos estudiando se presentará de una forma u otra dependiendo del aparato elegido para medir sus propiedades. Esto queda reflejado en el hecho de que si mantenemos el experimento de la doble rendija como aparece en la figura 1, el sistema presenta el patrón de interferencia; si alteramos nuestro aparato de medida (las placas con las rendijas) tal y como se muestra en la figura 3, el patrón ya no aparece. En relación principio de incertidumbre, vemos aquí que el observador parece jugar un papel en el resultado del experimento (que no parece ser el mismo si observamos que si no lo hacemos, si usamos para observar un aparato de medida que otro), lo cual nos resulta altamente contra intuitivo.

Lo que podemos concluir de esto, es que la medida afecta de alguna manera al sistema físico, pues no parece que podamos saber cómo era la partícula (o qué camino sigue el fotón) antes de que midiéramos sus propiedades¹⁰. Sin embargo, resulta difícil dejar de

ellos serán duros y la otra mitad blandos. Lo mismo sucederá en el caso de los electrones negros, y en el caso de que decidamos realizar el experimento a la inversa (medir primero la dureza y después el color).

¹⁰ No nos referimos aquí a que nuestro modo de medir sea impreciso, en el sentido de que nuestro aparato sea defectuoso y nos haga errar en la medición de modo que podríamos subsanar este error mejorando el aparato o teniendo en cuenta el defecto que imprime sobre la medición. El problema es que la medida afecta al sistema de forma impredecible; sabemos que al medir nuestra partícula pasa a ser blanca o negra, pero no podemos saber cuál de los dos estados va a ser el resultante, ni en qué estado estaba antes de que la sometiéramos a la medición.

preguntarnos cómo son las cosas cuando no miramos; tendemos a pensar que tiene que haber una verdad, aunque no seamos capaces de conocerla. Hay quien dirá (veremos quién en la siguiente sección) que la respuesta a esta pregunta es la superposición. Un estado de superposición, siguiendo con el ejemplo del color, sería aquel en el que la partícula no es ni blanca ni negra, podríamos decir que es en cierta medida las dos cosas a la vez (que no gris, se trata de un estado distinto en el que se superponen los dos posibles valores de la propiedad, no estamos hablando de un tercer valor nuevo). Es decir, si representamos el estado “blanco” de la partícula con χ y el estado “negro” con ϕ , un estado de superposición de ambos estados sería ψ , tal que $\psi = \alpha\chi + \beta\phi$. α y β representarían simplemente los coeficientes correspondientes a cada estado (el peso que tienen en la superposición).

Los estados de superposición quedan descritos por la función de onda, que describe todos los posibles valores que puede tener el estado del sistema. Esta descripción es de tipo probabilístico, asunto que fue discutido por el mismo Schrödinger, pero que a día de hoy parece ser la forma más aceptada de entender el tratamiento de la función que hace su ecuación. Es decir, la ecuación de Schrödinger tiene muchas más aplicaciones además de describir la evolución de las partículas subatómicas (que es en lo que nos habíamos centrado a la hora de presentarla). Se trata de una ecuación lineal que al igual que describe cómo los electrones saltan de un nivel a otro dentro del átomo, describe también cómo evolucionan otros sistemas físicos microscópicos, en el caso de nuestra partícula, cómo evoluciona su estado de superposición previo a la medición en el que, como hemos dicho, ni es blanca, ni es negra.

Sin embargo, la ecuación de Schrödinger no describe cómo pasa la partícula de estar en superposición a ser blanca o negra (que son estados determinados del sistema), siendo esto lo que efectivamente ocurre, y los únicos estados a los que podemos acceder a través de la medida. La ecuación no puede hacer esto porque como hemos dicho, se trata de una ecuación lineal, y el paso de una superposición a un estado determinado se trata de una evolución no lineal del sistema. En la interpretación más tradicional de la teoría (que trataremos de presentar de forma más ordenada en el siguiente capítulo), este proceso se conoce como el colapso del sistema. Es decir, que cuando no observamos, cuando no medimos, los sistemas cuánticos como nuestra partícula estarían en estados de superposición que evolucionan acorde a la ecuación de Schrödinger. Una vez que realizamos una medición sobre ellos colapsarían, rompiéndose la superposición y determinándose el sistema en uno de los estados clásicos que formaban su estado de superposición anterior (en el caso de nuestra partícula, o bien estado blanco o bien estado negro si lo que estamos midiendo es la propiedad color). En principio este colapso es aleatorio, es decir, que incluso conociendo los estados que forman la superposición, no podemos saber en cuál de ellos se colapsará el sistema (si el resultado de la medición será blanco o negro). Sin embargo, podemos hacer predicciones en base a los coeficientes correspondientes a cada estado (que recordamos que en $\psi = \alpha\chi + \beta\phi$ eran α y β). Tradicionalmente se entiende que estos coeficientes están estrechamente

relacionados con las probabilidades que hay de que la superposición colapse en estado blanco o en estado negro; es decir, si $\alpha > \beta$ es más probable que tras medir el sistema físico, el resultado sea blanco que negro. Sin embargo, cómo interpretar estos coeficientes es un asunto controvertido que trataremos de forma más amplia en capítulos posteriores.

En definitiva, vemos que se da una contradicción entre lo que se supone que pasa, y lo que nosotros vemos que de hecho pasa. La ecuación de Schrödinger describe estados de superposición en los que, siendo consecuentes con la teoría hasta sus últimas consecuencias, todo debería estar; tanto los sistemas, como los aparatos de medida y todo lo que les rodea. Pero no es esto lo que observamos; nunca presenciamos estados de superposición. Sólo nos es posible acceder a la realidad cuántica a través de los experimentos, y los experimentos sólo nos muestran resultados determinados. Sin embargo, lo que la teoría nos dice y lo que podemos deducir a partir de estos experimentos, es que si no medimos los sistemas se encuentran en estados no determinados.

¿Cómo y por qué sucede esto? Parece que no encontramos en la mecánica cuántica la respuesta, pues no se trata de una teoría que describa sin más el mundo, sino que presenta una serie de tensiones e interrogantes que en principio no resuelve. Se hace por ello urgente la necesidad de interpretar la teoría, es decir, explicar qué subyace a este comportamiento contraintuitivo de los fenómenos. No existe un consenso en la comunidad científica acerca de cuál es la forma correcta de interpretar los resultados que hasta aquí hemos presentado, sino que surgen a lo largo del siglo XX interpretaciones diversas acerca de los mismos. En el siguiente capítulo procedemos a exponerlas brevemente, haciendo hincapié en los puntos fundamentales de cada una de ellas.

3. Interpretaciones

Ahora que hemos introducido a grandes rasgos un contexto histórico, la gran pregunta es: ¿cómo interpretamos los descubrimientos de la mecánica cuántica? Es importante distinguir lo que sabemos de lo que deducimos. En la teoría cuántica, lo que sabemos, es que el sujeto que observa parece jugar un papel relevante en el resultado de los experimentos, hasta el punto de que lo único que podemos decir de un sistema cuántico es lo que obtenemos a raíz de estos experimentos: no podemos saber cómo era un sistema físico cuántico ni antes ni después de que lo observemos¹¹. Una cosa es lo que observamos en el sistema, y otra lo que le atribuimos al mismo a partir de dicha observación.

Es aquí dónde empieza el terreno de las interpretaciones: cómo entendemos lo que sabemos, y qué podemos deducir a partir de ello para especular sobre la verdad que hay detrás de los experimentos. La mecánica cuántica es una teoría innovadora, contra intuitiva y para la cual se torna urgente la interpretación. Siendo hoy un campo de conocimiento abierto del que queda mucho por descubrir, existen multitud de interpretaciones acerca de la teoría, de las cuales destacan las siguientes:

1. **La interpretación de Copenhague.** Se trata de un conjunto de interpretaciones que incorporan el principio de incertidumbre y que defienden el postulado del colapso. Dicho postulado viene a decir que hay un momento en el que se rompe el estado del sistema descrito por la ecuación de Schrödinger, que sería un estado de superposición. Es decir, se produce un colapso y se determina el estado de la partícula: o es blanca o es negra. Bohr observó que

en el mundo cuántico, al contrario que en el clásico, no puede realizarse nunca una observación de un sistema sin alterarlo. Pero, ¿cómo podemos llegar a conocer entonces el estado del sistema? El postulado cuántico parecería implicar que la distinción clásica entre observador y lo observado ya no sería sostenible. ¿Cómo sería entonces posible obtener un conocimiento objetivo? Las reflexiones de Bohr sobre estas cuestiones y otras relacionadas le llevaron a la introducción de la noción de complementariedad, denotando el uso de puntos de vista complementarios pero mutuamente excluyentes en la descripción de la naturaleza. (Kragh, 2007, pp. 202-203).

¹¹ Volviendo al experimento de la doble rendija: el resultado del experimento es el patrón de interferencia que presentan las partículas, y lo que podemos saber es que pasando la placa de las dos rendijas, las partículas llegan al otro lado siguiendo ese determinado patrón. ¿Cómo han llegado a formar el patrón? Entrar ahí es hacer deducciones. No sabemos por qué rendija ha pasado la partícula, qué trayectoria ha seguido exactamente, etc. En cuanto intentamos averiguar este tipo de información, el patrón de interferencia desaparece.

El concepto de complementariedad supone una piedra angular en la interpretación de Copenhague, y un ejemplo del mismo sería la dualidad onda corpúsculo de la que hablamos en la sección anterior.

La interpretación de Copenhague entiende que este colapso se produce en el momento en el que se mide, que se puede entender como el momento en el que interviene un aparato de medida (Von Neuman) o cuando interviene un observador consciente (Wigner).

2. **Teorías del colapso (GRW)**¹². Difieren con la interpretación de Copenhague en el vínculo que ésta establece entre la medida y el colapso; para las teorías del colapso no existe entre ambos fenómenos una relación causal, aunque uno no pueda darse sin el otro. Su vinculación es más de tipo probabilístico. Según estas teorías, un sistema microscópico aislado se mantendría en estado de superposición, y el colapso se produciría de forma espontánea (sin razón aparente) cada cien millones de años aproximadamente. Esta cifra es tan alta debido a la naturaleza microscópica del sistema: cuanto menor sea el número de partículas que lo forman, más tiempo consecutivo permanecerá en estado de superposición. Para que el sistema esté en superposición, todas sus partículas han de estarlo. Basta con que una de ellas colapse para que lo hagan todas, y esto es lo que sucede al intervenir en el sistema otro sistema macroscópico (el aparato de medida). Al aumentar exponencialmente el número de partículas que forman el sistema, disminuirá el tiempo consecutivo que el sistema esté en superposición, o dicho de otro modo: aumentará la probabilidad de que se produzca un colapso. Puesto que el aparato de medida está compuesto de muchísimas más partículas que el sistema microscópico original, por una simple cuestión de estadística hará que el este segundo colapse.

3. **Teoría de Bohm**. Siguiendo la línea de Louis de Broglie, Bohm mantiene el formalismo y el contenido empírico de la mecánica cuántica, pero proyectándolo bajo la metafísica propia de la física clásica (Albert 1994, pp. 134-135). Acorde a esta teoría el mundo estaría formado por partículas clásicas (con velocidades y posiciones bien definidas), cuyo movimiento quedaría determinado por la función de onda¹³, que se considera aquí un campo (en tanto que es una perturbación del espacio-tiempo). Así, la ecuación de Schrödinger determinaría el movimiento de las partículas, pues dicho movimiento sería guiado por la perturbación de la función de onda. A este planteamiento, Bohm le añadirá una función capaz de determinar la velocidad y posición de cada partícula a partir de

¹² Existen varias teorías de este estilo, pero nos estamos centrando aquí en la de Ghirardi, Rimini y Weber (GRW).

¹³ La función de onda es un objeto matemático que representa el estado físico de un sistema; en relación con los epígrafes anteriores, la ecuación de Schrödinger describe de forma determinista la evolución de dicha función, es decir, como ya dijimos, del estado del sistema.

la función de onda. Estaríamos aquí ante una teoría determinista que reproduce sin embargo los resultados de la mecánica cuántica.

4. **Interpretación de Everett.** No asume el colapso y respeta el formalismo de la mecánica cuántica tal cual ha sido presentado. Sin embargo, renunciar al colapso implica asumir una constante superposición, lo cual parece contradecir la experiencia. El reto de la interpretación será explicar esto. De esta idea se derivarían teorías como la de las Muchas Mentes o la de los Muchos Mundos, en la cual vamos a centrarnos en el resto de este ensayo.

4. La interpretación de Everett

Esta interpretación defiende que, al contrario de lo dicho hasta ahora, no se da una incompatibilidad entre la superposición y la determinación de los resultados empíricos (causados según la interpretación de Copenhague por un presunto colapso). Tal y como hemos presentado la cuestión, parece que el formalismo de la mecánica cuántica nos lleva a aceptar que el estado natural de los sistemas cuánticos, sin mediciones, es la superposición, aunque esta premisa sea una y otra vez contradicha por la experiencia. Schrödinger ilustró esta cuestión con su famoso experimento mental: supongamos que tenemos una caja opaca en la que introducimos un gato y un dispositivo que conecta un detector de electrones a un martillo en contacto directo con un frasco de veneno. Un electrón es disparado, con la caja completamente cerrada, y esto abre dos opciones: que el detector lo capte, active el martillo y se rompa el frasco, liberando el veneno que matará al gato, o bien que el electrón siga la trayectoria contraria y nada de esto suceda. Hay un 50% de probabilidades de que ocurra una cosa o la otra, lo que en el formalismo cuántico tradicionalmente interpretado se traduce en que, hasta que no abramos la caja, el gato estará en un estado de superposición de los estados vivo y muerto (es decir, vivo y muerto a la vez). Esto es lo que la cuántica postula, pero sin embargo, siempre que abrimos la caja vemos al gato o bien vivo, o bien muerto. La experiencia empírica nunca puede acceder a tal estado de superposición.

Podemos postular que dicha contradicción se justifica por la diferencia entre el funcionamiento del mundo macroscópico y del microscópico, por la intervención de un observador consciente o porque simplemente el formalismo cuántico está equivocado. Fuere como fuere, las predicciones de la cuántica y la experiencia parecen estar inevitablemente avocadas a la incompatibilidad. Sin embargo, si nos ceñimos al formalismo, encontramos que éste tan sólo dice que hay estados que representan objetos diferentes a la vez (la superposición de estados con propiedades incompatibles como ψ^{14}), en nuestro ejemplo, la superposición de dos estados: un estado que representa un gato vivo y otro estado que representa un gato muerto. De aquí no se sigue necesariamente que haya objetos en un estado indeterminado (que decir que un gato está en ψ signifique que está a la vez vivo y muerto).

En definitiva, lo que la interpretación de Everett vendría a decir es que a nivel macroscópico, los estados cuánticos de superposición “son simplemente estados del mundo en los que más de un objeto macroscópico definido está teniendo lugar a la vez. Las superposiciones macroscópicas no describen la indeterminación, sino que describen multiplicidad” (Wallace, 2010, p. 5)¹⁵. Es decir, si entendemos que, tal y como la física cuántica describe, la ecuación de Schrödinger representa el estado y evolución del

¹⁴ $\psi = \alpha\chi + \beta\phi$, siendo α y β coeficientes, números complejos que satisfacen $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$; χ y ϕ serían estados que representan al gato vivo y al gato muerto respectivamente.

¹⁵ La traducción de esta cita al español es propia, así como todas las demás extraídas de obras en lengua inglesa que aparecen de aquí en adelante.

mundo, habría objetos que se encuentran simultáneamente en estados que a primera vista son incompatibles (habría gatos que estarían a la vez vivos y muertos). Tales objetos implicarían rápidamente a todo sistema que entrase en contacto con ellos, con lo que ya no estaríamos ante sistemas muy concretos en estado de superposición, sino que regiones amplias de objetos y eventos se verían afectadas por estos estados. Como hemos citado, Everett no interpreta esto como indeterminación, sino como multiplicidad: que estos estados se den a la vez no implica la existencia de un estado indefinido, sino que ambos estados tienen lugar a la vez formando mundos diferentes. O dicho de otro modo: que un gato esté en ψ significa para la interpretación de Everett que existe paralelamente un mundo en el que el gato está vivo, y otro en el que el gato está muerto.

Estos mundos de existencia simultánea no tendrían modo alguno de interactuar entre sí, evitando estados extraños en los que el mismo gato en su estado vivo y en su estado muerto coexistan (veremos más adelante por qué). A su vez, esto explica nuestra imposibilidad para percibir la existencia de estos mundos múltiples; uno sólo puede estar en un mundo, el suyo, ignorando por tanto el trascurso de los acontecimientos en cualquier otro mundo (y su mera existencia).

Estrictamente hablando, esta es la interpretación que Everett hace de la mecánica cuántica. Se trata de una forma peculiar de enfrentarse al formalismo, que en realidad no hace más que tomarlo literalmente. No hay lugar aquí para postulados físicos adicionales que describan cómo tiene lugar la ramificación de los mundos o cuestiones similares. Everett trata el formalismo matemático de la cuántica tal cual, sin añadir nada. Sin embargo, esto deja lugar para muchas preguntas, cuya respuesta sí necesita algo más, y que autores como David Albert o Jeffrey A. Barrett se encargarán de responder.

Una forma más actual de entender a Everett es lo que se ha llamado *bare theory*, es decir, se interpreta la mecánica cuántica en su forma más fiel al formalismo: considerando *solamente* la ecuación de Schrödinger. El colapso quedará reducido a una cierta apariencia: son los sujetos los que creen que sus percepciones están determinadas (otra cosa es que esta creencia sea cierta).

Lo que autores como Jeffrey A. Barrett (Barrett, 1999, pp. 47-55) cuestionan es, ¿por qué creemos que al realizar la medición cuántica no estamos en un estado de superposición? ¿sabemos acaso qué sentiríamos si lo estuviéramos? Parece que nos obstinamos en creer esto porque percibimos que el contenido de nuestras creencias es determinado (es uno u otro; o bien creemos que la partícula es blanca o bien creemos que es negra). Sin embargo, los defensores de la *bare theory* mostrarán que esto no es más que una creencia ilusoria, pues creeríamos lo mismo aunque el contenido de nuestras creencias no estuviera determinado.

No vamos a entrar aquí en la demostración que ofrece Barrett de esta cuestión, pues resulta difícil exponerla sin introducir algunos aspectos básicos del formalismo matemático que no hemos presentado en este trabajo. Sin embargo, podemos decir que la estrategia fundamental es poner en cuestión las propias creencias, manteniendo que el hecho de que el contenido de nuestras creencias esté determinado es compatible con estar en una superposición, ya que si estuviéramos en una no lo sabríamos.

Vemos así como, irónicamente, para considerar tan sólo el formalismo de la cuántica en su versión más simple, la *bare theory* llega bastante lejos en sus interpretaciones. El problema fundamental de esta teoría es que introduce la falsedad de nuestras creencias, que al fin y al cabo son las mismas que usamos para *creer* que nuestras creencias son falsas. Para tratar de salvar este problema se recurre a la interpretación de los Muchos Mundos.

5. Muchos Mundos

Esta interpretación mantiene la idea everettiana de que no hay algo así como un colapso y que lo único que existe es un estado de superposición (ψ). Dicha superposición se asume interpretando que cada término de la misma es un mundo; es decir, en ciertos momentos el universo se divide dando lugar a varias ramificaciones.

A este planteamiento se le puede objetar que no parece justificar explícitamente por qué entiende la superposición cuántica como multiplicidad, ya que no hay en la experiencia nada que nos lleve a inferir esta interpretación del formalismo (vimos que la postura de Everett era cuestionar la propia experiencia¹⁶). Para incorporar los Muchos Mundos al planteamiento everettiano, no basta con el mero formalismo cuántico como Everett pretendía inferir, lo cual será criticado por físicos como Adrian Kent:

...quizá uno pueda ver intuitivamente los componentes correspondientes [de la función de onda] como descripción de varios mundos independientes. Pero esta interpretación intuitiva va más allá de lo que los axiomas justifican: los axiomas no dicen nada sobre la existencia de mundos múltiples físicos que se correspondan con los componentes de la función de onda (Kent, 1990, p. 11).

Parte de los físicos que apoyaron la interpretación de Everett durante las últimas décadas del siglo XX han aceptado esta crítica, y le han hecho frente proporcionando al formalismo cuántico original los elementos necesarios para poder ser interpretado desde una perspectiva everettiana con algo más de rigor. Para ello, es necesario añadir al vector de la función de onda un conglomerado de elementos que se corresponderán con los mundos. Cada mundo estaría representado por variables dinámicas, que serían la base de la función de onda (base en la que quedan bien definidas las propiedades que se están midiendo). Así, la función de onda puede descomponerse en vectores ortogonales (las bases), identificándose cada uno con un mundo.

En otras palabras, lo que esta interpretación supone es que tenemos una función de onda del universo en su conjunto, es decir, que representa el estado global del universo. Dicha función evoluciona siguiendo la ecuación de Schrödinger. Tendríamos así una descripción física del mundo a nivel global; a nivel local tendríamos los Muchos Mundos nombrados, entre los cuales en principio no puede haber interacción. Así, para describir completamente la realidad no basta con la función de onda (base en la que quedan bien definidas las propiedades que se están midiendo); dicha función se descompondría en vectores ortogonales, identificándose cada uno de ellos con un mundo y habiendo en cada uno de ellos un registro determinado de toda medida. Cabe destacar que esta manera de enfocar la interpretación de los Muchos Mundos bebe del

¹⁶ En el sentido de que el sujeto tiene una visión parcial de la realidad al no poder acceder a los mundos paralelos que no son el suyo; tener acceso a todos los mundos significaría tener una visión completa del universo que nos permitiría comprenderlo. Esto implica que el colapso no es más que una ilusión, pese a ser lo que la experiencia parece mostrar; la experiencia nos engañaría en este sentido por mostrarnos el mundo de forma incompleta.

trabajo de DeWitt en los años 70, concretamente tal y como lo presenta en su obra *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics* (1973).

La diferencia principal entre la interpretación de los Muchos Mundos y la de Copenhague queda muy bien ilustrada en un experimento mental conocido como el suicidio cuántico (Tegmark, 1998). Dicho experimento funciona de forma similar al del gato de Schrödinger, salvo que aquí el observador asume el papel del gato. El experimento es como sigue: pongamos que tenemos una pistola con la que nos apuntamos a la cabeza, tal que dicha pistola está conectada a una máquina que mide la rotación de una partícula subatómica. Cada vez que apretamos el gatillo, el arma sólo se dispara si la partícula rota en sentido horario (la otra opción es que la partícula gire en sentido contrario, en cuyo caso la pistola no se dispara). La interpretación de Copenhague, que entiende la ecuación de Schrödinger en sentido probabilístico, entenderá que cada vez que disparamos tenemos un 50% de probabilidades de sobrevivir, y un 50% de hacer el suicidio efectivo (se colapsa una opción o bien la otra). En la interpretación de los Muchos Mundos sin embargo, siempre sobreviviríamos, pues cada vez que disparamos el mundo se divide en dos y siempre hay uno de los dos mundos en el que sobrevivimos. Estrictamente hablando, podríamos decir que también morimos siempre, pero puesto que en los mundos en los que morimos para nosotros nuestra historia se acaba, nuestra percepción será siempre la de haber sobrevivido¹⁷. Es decir, si la interpretación de los Muchos Mundos es válida, el sujeto en este experimento podría apretar el gatillo infinitas veces, sin morir nunca. Esto es lo que se conoce como inmortalidad cuántica, aunque no hemos de olvidar que se trata tan sólo de un experimento mental. Si tratáramos de hacer el experimento efectivo y la interpretación de los Muchos Mundos fuera cierta, efectivamente no moriríamos nunca a causa de nuestros propios disparos. Sin embargo, la muerte natural no es un acontecimiento cuántico como lo es apretar el gatillo conectado a la máquina medidora de rotación. Se trata más bien de un proceso gradual, en el que no hay dos posibilidades que se sigan de una superposición, por lo que antes o después, acabaríamos muriéndonos naturalmente igual que lo hacemos en el mundo clásico.

A la interpretación de los Muchos Mundos pueden criticársele varios aspectos, destacando entre ellos el hecho de que no es una interpretación falsable. Puesto que no puede haber interacción entre los mundos múltiples, no hay forma de comprobar empíricamente que existen (no podemos acceder a ningún mundo fuera del nuestro). En la página anterior dijimos que la interacción entre los mundos no es posible *en principio*. Introdujimos este matiz, porque en realidad, sí existe la posibilidad de reunir las ramas en las que el mundo se ha bifurcado si lo hacemos en un periodo brevísimo de tiempo. Por ejemplo, pongamos que tenemos una partícula como la que usamos para presentar el problema de la medida en la página 9, tal que esta pueda ser blanca/negra y dura/blanda. Pongamos que introducimos la partícula en un aparato de medida del color, de forma que si es blanca el aparato la expulsará por un conducto y si es negra la expulsará por otro. Montamos un sistema tal, que en frente de cada conducto haya situados dos espejos, de forma que éstos modifiquen la trayectoria de las partículas pero

¹⁷ Si consideramos un instante mínimo de conciencia antes de morir en el mundo paralelo en el que no sobrevivimos, también podemos decir que experimentaríamos siempre la muerte; cómo enfocar esto depende a mi modo de ver del optimismo del lector, pero no olvidemos que no es más que un experimento mental para marcar la distinción entre la interpretación de Copenhague y la de los Muchos Mundos.

no su estado (si al llegar al espejo la partícula era negra, debería seguir siéndolo al continuar su ruta tras chocar con éste). De esta manera, las partículas vuelven a reunirse en una caja negra, que sería un dispositivo que simplemente volvería a almacenarlas y a expulsarlas por un conducto único, de forma que tras pasar por la caja negra volvemos a no saber si las partículas son blancas o negras (tendríamos que colocar de nuevo un aparato de medida tras ella para averiguarlo).

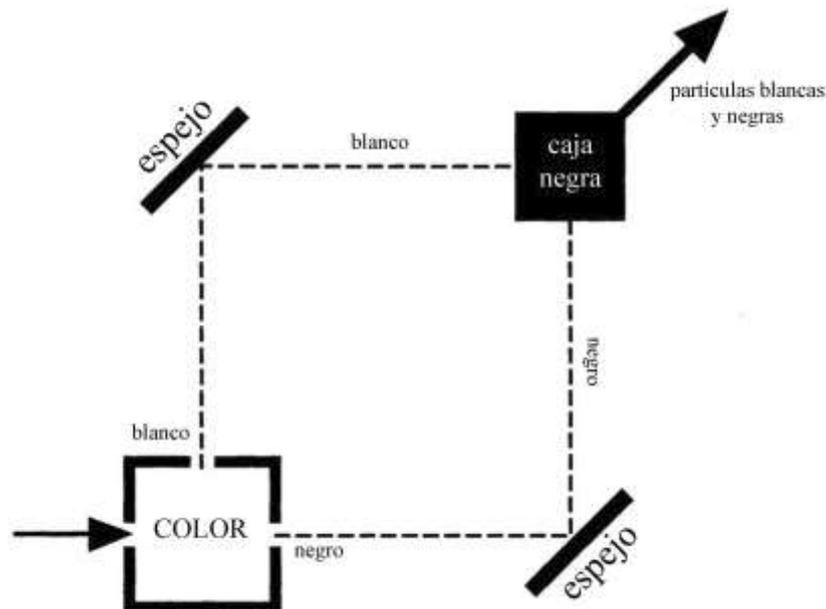


Figura 4

Lo que conseguiríamos al montar un sistema como el que aparece en la figura 4 es que el mundo se ramificase una vez que la partícula atraviesa el primer aparato de medida (en dos mundos, uno en el que la partícula es blanca y otro en el que es negra) y dichas ramas volvieran a converger una vez que llega a la caja negra, pues ésta “deshace” el proceso de medición y revierte el estado de la partícula a la superposición en la que se encontraba antes de ser medida. Sin embargo, incluso aunque ejecutáramos este tipo de operación, seguiríamos sin poder decir que esto nos permita demostrar empíricamente la existencia de mundos paralelos; esto se debe a que cuando las ramas convergen, todo vuelve al estado en el que estaba antes (la partícula vuelve a su estado original), incluida la conciencia del observador. Es decir, que si tenemos un observador que fuera partícipe de todo este proceso, él mismo se habría ramificado y vuelto a ser uno, pero el volver a ser uno implica que no podría recordar el proceso de ramificación ni el hecho de haber visto en un mundo la partícula blanca y en otro mundo la partícula negra (Rae, 1986, pp. 76-77). De todas formas, esta posibilidad remota de hacer converger mundos diferentes seguiría siendo un caso excepcional, pues debido a la decoherencia (que introduciremos unas líneas más abajo), sólo podría darse en sistemas muy pequeños (cuanto más grande es el sistema, más difícil resulta devolverlo a su estado original). Puesto que además hemos visto que este proceso seguiría sin aportarnos nada, en tanto que no seríamos conscientes de habernos ramificado y vuelto a converger, obviaremos de aquí en adelante esta posibilidad excepcional, puesto que a efectos prácticos podemos decir que no hay interacción causal entre mundos diferentes: no podemos mandar señales de unos a otros y no podemos conocer nada que esté fuera de nuestro mundo. Pese a esta dificultad, esto no es un rasgo de la interpretación que fuera introducido arbitrariamente

para evitar ser refutada, sino que quedaría explicado en base a la teoría de la decoherencia.

La teoría de la decoherencia explica cómo un estado cuántico entrelazado¹⁸ se convierte en un estado clásico. La interacción de las partes de un sistema complejo hace que dicho sistema pierda sus propiedades cuánticas. Según esto, cada partícula actuaría como si fuera un observador que mide constantemente el estado de las partículas que le rodean. La interpretación de Copenhague entendía que este intercambio de información concreta el sistema en una de sus múltiples posibilidades; para la interpretación de los Muchos Mundos, lo que sucede es que el mundo se ramifica dando lugar a tantos mundos como opciones albergara la superposición, existiendo todas ellas de forma paralela, cada una en su mundo correspondiente. Cuanto mayor sea el sistema, mayor es su sensibilidad a la decoherencia, hasta que finalmente se hace clásico. De ahí que esto suceda al efectuarse una medición, pues el sistema cuántico interactúa con el aparato de medida, con el observador, etc., entendiendo por ese etcétera tan lejos como queramos llevar la división entre lo que consideramos sistema y lo que consideramos su entorno (pues dónde trazar esa línea resulta controvertido). Al interactuar con el entorno, el estado del sistema cuántico evolucionaría hacia una superposición no entrelazada de estados clásicos, que Everett entendería como mundos paralelos. Volviendo al ejemplo del gato de Schrödinger, efectuar una medición sería en este caso mirar dentro de la caja; para un everettiano, al hacer esto estaremos dando lugar a un mundo en el que el gato está vivo y otro en el que el gato está muerto. Lógicamente, nosotros sólo vamos a percibir una de las opciones, pero aceptar esta interpretación implica creer que hay una realidad paralela en la que nosotros mismos nos hemos desdoblado y estamos mirando la misma caja, viendo al gato en el estado contrario en el que de facto, en nuestro mundo, lo estamos viendo. Al medir estaríamos por tanto disminuyendo la incertidumbre respecto al estado del sistema que estamos midiendo, pero a costa de aumentarla respecto al estado global del universo, que estaría con cada medición más ramificado que antes, resultando por tanto cada vez más y más difícil (por no decir imposible)¹⁹ conocer el estado de todos los sistemas que albergan todas sus ramificaciones. Así entendido, realizar mediciones sobre sistemas cuánticos es alterar el mundo de forma irreversible.

¹⁸ Un estado cuántico entrelazado es aquel en el cual el estado de unas partículas depende del de otras, es decir, que no se puede describir el sistema mediante descripciones individuales de sus partes.

¹⁹ Como hemos dicho, si no puede haber interacción entre los mundos, obviamente no podemos realizar mediciones sobre sistemas que estén en un mundo que no es el nuestro; ignoramos por tanto todo lo que sucede fuera de nuestro mundo, y en la medida en la que aumentemos este ámbito de realidad ajena a nuestro mundo (a base de ramificarlo), mayor será nuestra ignorancia.

6. Muchas Mentes

Si asumir que existen multitud de mundos paralelos al nuestro nos resulta ontológicamente demasiado fuerte, hay otra opción que reduciría dichos mundos a una mera apariencia: la interpretación de las Muchas Mentes (Wallace, 2010, pp.7-9).

En esta interpretación, la multiplicidad que Everett veía en la ecuación de Schrödinger no sería más que ilusoria. Volviendo al ejemplo del gato, cuando el pobre animal está en ψ , realmente se hallaría en un estado indeterminado (volvemos a interpretar la superposición como indeterminación y no como multiplicidad), tal que si un observador mide el estado del gato (lo observa) su propio estado quedará entrelazado al del gato, de modo que ambos entrarán en un estado de superposición. Así, el sistema formado por el gato y el observador quedaría representado como sigue:

$$\alpha|Gato vivo \rangle \otimes |Observador ve el gato vivo \rangle + \beta|Gato muerto \rangle \otimes |Observador ve el gato muerto \rangle$$

De este modo, a cada observador le corresponde un conglomerado de estados mentales (muchas mentes), cada uno de los cuales estaría asociado a una experiencia definida. En relación con el estado de nuestro sistema, la proporción de estados mentales en los que nuestro observador percibe al gato como vivo es $|\alpha|^2$. Esto significa que, estableciendo una analogía con la interpretación de los Muchos Mundos, cada observador tendría una base de consciencia (al igual que a cada mundo le correspondía una base).

Esto puede generar cuestiones respecto a la coherencia y el funcionamiento práctico de nuestra experiencia cotidiana. Si cada observador tiene varias mentes que se corresponden con percepciones distintas de la realidad, ¿cómo encaja esto con las percepciones del resto de observadores? ¿cómo no nos hemos dado cuenta de que nuestro enfoque del mundo no coincide con los enfoques ajenos? La interpretación de las Muchas Mentes responde estas preguntas aludiendo a un fenómeno de entrelazamiento similar al que planteábamos entre el observador y el gato, de forma que

Cuando el estado de un observador es un elemento de la base de consciencia, todas las mentes asociadas con ese observador tienen la misma experiencia que él, con lo que podríamos decir que el observador está teniendo esa experiencia. Pero en todas las situaciones realistas el observador estará en algún tipo de superposición de estados de la base de consciencia, y el conglomerado de mentes asociado con ese observador estará dando lugar a una amplia variedad de experiencias distintas (Wallace, 2010, p. 8).

Vemos así que prescindir de la existencia ontológica de los mundos nos lleva a algo casi más exigente: suponer que los axiomas de la cuántica responden no sólo a una cierta configuración del mundo, sino al modo particular en el que nosotros lo percibimos. El problema de esta interpretación es que, entender así la consciencia humana muy difícilmente podría reconciliarse con la posibilidad real de conocimiento. Parece, de

nuevo, que este tipo de enfoques tratan de ajustar el formalismo más a nuestra percepción del mundo que al mundo en sí, estirando tanto la conexión entre ambos que casi llega a romperla.

Al igual que sucedía con la *bare theory*, vemos aquí que esta reinterpretación moderna del planteamiento de Everett presenta más problemas de los que pretendía solucionar. Tanto la *bare theory* como la interpretación de las Muchas Mentes se centran, en mi opinión, excesivamente en la percepción del sujeto, hasta el punto en el que esta queda casi desconectada de la realidad en sí. Cuestionar excesivamente nuestro modo de conocer es un movimiento peligroso, pues al fin y al cabo es el mismo método que hemos empleado para llegar a dicho cuestionamiento y a la formulación de la teoría.

Las Muchas Mentes exigen además un conglomerado de elementos que responda a la existencia de dichas mentes; puesto que dicha exigencia habría de darse para cada sujeto cognoscente del mundo, se despliega aquí un formalismo excesivamente complicado, que traiciona la simplicidad de la que Everett hacía gala. Las Muchas Mentes se adentran en la mente del observador a fin de eliminar la extravagancia ontológica que los Muchos Mundos ubicaba fuera de ella, cambiando con ello de lugar el problema más que eliminándolo. Pese a que la interpretación de los Muchos Mundos pueda resultar a primera vista poco plausible, vemos que es la mejor opción respecto a sus reinterpretaciones modernas, que retuercen la cuestión innecesariamente.

Sin embargo, esto no significa que la interpretación de los Muchos Mundos no presente problemas. Dichos problemas girarán en torno a la cuestión de justificar de forma adecuada la existencia ontológica de los mundos, reto al cual los defensores de Everett se siguen enfrentando. En el siguiente capítulo, procedemos a presentar algunos de los problemas principales de la interpretación.

7. Crítica a la interpretación de los Muchos Mundos

7.1. El problema de la base privilegiada

Un primer problema de la interpretación de los Muchos Mundos (que encontraríamos también de forma paralela en la de las Muchas Mentes) es encontrar un criterio que nos permita identificar la base privilegiada entre muchas posibles, tal que nuestra base permita dividir la función de onda de forma que sea posible identificar los mundos. Hemos dicho que cada mundo se corresponde con un vector perteneciente a la función de onda, que representa el estado global del mundo. Así, la base sería un conjunto de vectores linealmente independientes²⁰ de los demás tal que pueda generarlos; es decir, que todos los demás vectores puedan ser reescritos en función de esa base. Por ejemplo, dado \mathbb{R}^3 como espacio vectorial, una base para él sería $B = \{(1, 0, 0); (0, 1, 0); (0, 0, 1)\}$. Es posible escribir en base a B cualquier vector de \mathbb{R}^3 multiplicándolo por B , tal que (si $\vec{a}: (a_1, a_2, a_3)$ es un vector cualquiera) \vec{a} en base a B quedaría: $\{a_1(1, 0, 0); a_2(0, 1, 0); a_3(0, 0, 1)\}$.

Una base privilegiada nos permitiría determinar los estados locales de los mundos, directamente dependientes de la función de onda (que describe el estado global). Cabe considerar, que si la función evoluciona, el número de mundos también (no está determinado cuántos mundos va a llegar a haber). No podemos escoger una base privilegiada porque no sabemos cuál es el criterio que dota de continuidad al mundo, a la multitud de historias paralelas que existen; cabe pensar que dicho criterio es nuestra propia conciencia, pero es difícil justificar esta hipótesis, que peca de antropocéntrica. Citando a Jeffrey A. Barrett:

El problema de la base privilegiada es entonces que no conocemos qué propiedad física necesitamos para dar cuenta de forma determinada de nuestra experiencia, e incluso si lo supiéramos, suponiendo que dicha propiedad fuera la única propiedad física determinada, esto haría que nuestra teoría pareciera obtenida ad hoc. Finalmente, no hay razón para creer que los seres sintientes evolucionarían naturalmente de tal modo que sus percepciones más inmediatas se correspondieran con la propiedad física que estaría de hecho siempre determinada. (Barrett, 1999, p. 175).

Podríamos tratar de escoger una base privilegiada independientemente de los detalles que conciernen a nuestro cerebro y a nuestra manera particular de percibir la experiencia; pero dado que la meta última de esta interpretación es precisamente explicar nuestra experiencia, parece que no podemos ignorar estos factores.

²⁰ Él mismo no viene generado por otros vectores de la función de ondas, es decir, no podemos llegar al vector base operando con otros vectores.

La interpretación de los Muchos Mundos dice que el mundo se ramifica cuando tiene lugar un evento cuántico del mismo tipo que una medición²¹, es decir, cuando la base privilegiada lo requiere. La base privilegiada determina cuándo se ramifica el mundo, es decir, cuáles son las correlaciones físicas que nos llevan a resultados determinados en los experimentos. En tanto que la elección de una base privilegiada significa elegir qué interacciones constituyen mediciones y cuáles no, no poder determinar cuál es esta base supone un problema análogo al que suponía el problema de la medida en la interpretación de Copenhague. Así como entonces no podíamos determinar cuándo estábamos realizando una medición (¿qué significa medir?), ahora está claro cuando se supone que el mundo va a ramificarse.

Además, esta interpretación va un paso más allá de la teoría de Everett, pues exige una base (no sólo la ecuación de Schrödinger), lo que podría hacernos pensar que traiciona su espíritu. Si la pretensión de Everett era ofrecer una interpretación que nos permitiera comprender la mecánica cuántica sin la necesidad de añadir nada a su formalismo, parece que la exigencia de una base privilegiada olvida en ese sentido la pretensión original.

7.2. La naturaleza de los mundos

Otros problemas de la interpretación de los Muchos Mundos se refieren a la propia función de onda. Asumir esta interpretación es asumir que existen billones de mundos reales paralelos al nuestro. Si esto es así, cada vez que un observador realiza una medición y su mundo se ramifica, ¿cómo sabe cuál es el observador que se corresponde con él mismo de los muchos observables en los que se ha ramificado? Parece que no hay un criterio claro para diferenciar el mundo actual de los demás, llevándonos este problema a otra dificultad: la de no poder saber si se cumplen las predicciones. Así, la mecánica cuántica empezaría a desligarse de nuestras experiencias, pese a haber surgido precisamente por tratar de comprender las mismas (como explicamos en la introducción).

Uno de los responsables de la revitalización contemporánea del planteamiento de Everett es David Wallace. Wallace discrepa con la interpretación habitual de los Muchos Mundos en la manera de presentar los mundos, que entiende que ha de ser concretada, pero sin que su ontología suponga un problema para el resto del razonamiento. Wallace propondrá una interpretación de los mundos como estructuras emergentes, es decir que “no quedan directamente definidas en el lenguaje de la microfísica [...] pero eso no significa que sean de alguna manera independientes de la microfísica subyacente” (Wallace, 2010, p. 12). Así entendidas, todas las entidades con las que nos relacionamos cotidianamente son entidades emergentes (en tanto que no son entidades fundamentales) y no por ello negamos su existencia. Aparece así el problema de dar cuenta de los mundos como entidades emergentes (parece en principio más sencillo encontrar una solución al problema así reformulado que como la búsqueda de la base privilegiada). Este problema presenta a su vez dos problemas:

²¹ Usamos esta terminología, en lugar de decir simplemente “una medición” porque no está claro cuándo se ramifica el mundo exactamente; parece que tiene que darse algún evento de este tipo, en el que suceda lo mismo que sucede cuando medimos, pero puesto que ni siquiera está claro qué significa medir, dejamos esta cuestión abierta.

1. **El problema ontológico.** Estamos aquí ante la forma particular de Wallace de resolver el problema de la base privilegiada que presentábamos en el epígrafe anterior. Hasta ahora hemos dicho que si el estado cuántico es una representación fiel de la realidad, ha de dar cuenta de multitud de mundos casi clásicos que no interaccionan entre sí (en uno de los cuales estaríamos viviendo ahora mismo). Esto presenta el problema de que no encontramos en la función de onda tal estructura de mundos²²: o bien hay que modificar el formalismo introduciendo dicha estructura, o bien aceptar que tales mundos no existen. Para tratar de disolver el dilema Wallace introduce entidades emergentes (no fundamentales, pero que sin embargo existen²³), como un modo de concebir los mundos. Una entidad emergente es aquella que no podemos definir en los términos de la teoría con la que estamos trabajando (o sí podemos, pero no es conveniente), pero que no por ello deja de existir. Por ejemplo, está claro que las moscas existen, pero para la física cuántica serían entidades emergentes, pues estudiarlas en esos términos no tendría sentido. Resulta mucho más práctico estudiar las moscas desde la zoología que en términos de átomos y fenómenos cuánticos, aunque efectivamente estos puedan relacionarse con la biología y a su vez ésta con la zoología. Lo mismo sucedería con los mundos, que serían demasiado complejos para pretender definirlos ontológicamente desde la cuántica, pero no por ello negamos su existencia. Wallace llamará a esta forma de entender las entidades emergentes criterio de Dennett²⁴: son esenciales para las explicaciones pero no fundamentales, es decir, su realidad depende de su utilidad en las explicaciones. En otras palabras, entender los mundos como entidades emergentes significa atribuirlos una definición amplia, en la cual consideraremos que es un mundo todo lo que se comporte como tal. No se trata de concretar aquí una ontología, pues la realidad que les estamos atribuyendo depende de lo útiles²⁵ que nos resulten; los mundos son para Wallace reales en tanto que nos permiten explicar el resto del planteamiento everettiano y efectuar predicciones.

2. **El problema de la probabilidad.** Este problema puede a su vez subdividirse en dos subproblemas:
 - 2.1. Inteligibilidad de la probabilidad: ¿tiene sentido hablar de probabilidad en un mundo determinista? Wallace apostillará a este problema que quizá la probabilidad tampoco sea entendida en el mundo clásico, pues tendemos a relacionarla con la frecuencia, pero tenemos que admitir que no es lo mismo²⁶.
 - 2.2. El vínculo de la probabilidad cuántica con el sujeto. Hemos de ser capaces de conectar las probabilidades cuánticas con las clásicas, es decir, la influencia que tienen en nuestro día a día. Además, éstas han de ser capaces de contribuir a la ciencia con predicciones, pues ¿en qué sentido podemos decir que la experiencia apoya las predicciones de la mecánica

²² Porque no quedaban determinados por ella.

²³ No al nivel de la microfísica, pero sí en un plano global.

²⁴ Dennett no planteó su criterio homónimo pensando en la aplicación que aquí le estamos dando, sino que se trata de un recurso de Wallace.

²⁵ Entendemos aquí utilidad en el sentido de si aporta algo a las explicaciones o no.

²⁶ No parece que la probabilidad sea una propiedad del estado actual del mundo, puesto que no habla de la historia del universo, sino de las historias posibles. Podríamos en este sentido entender que sí hay probabilidad objetiva en el mundo everettiano. Discutiremos esto unas líneas más abajo.

cuántica si sean cuáles sean la apoyarán? El objetivo es reconciliar esta nueva forma de entender la probabilidad tanto con los intereses del sujeto como con la posibilidad de hacer en base a ella predicciones científicas coherentes.

En el siguiente epígrafe procedemos a profundizar en estas cuestiones.

7.3. El problema de la probabilidad

La interpretación de los Muchos Mundos parece eliminar el concepto de probabilidad tal y como lo entendemos; pues tradicionalmente, la probabilidad va de la mano de la incertidumbre: medimos la probabilidad de que un evento suceda, sabiendo que existe la posibilidad de que no lo haga. Dicha posibilidad se anula en el mundo everettiano, pues todo lo que puede suceder sucede en mundos diferentes.

Cabría pensar que es posible enfrentarse a la probabilidad entendiendo lo que antes eran probabilidades de que no se diera el caso como probabilidades de que el caso se de en un mundo distinto al mío; es decir, que si yo me sitúo como observador de nuevo frente a la caja que contiene al gato de Schrödinger, puedo calcular las probabilidades de que *en mi mundo* el gato esté vivo o muerto. Así, si por ejemplo calculo las probabilidades de que el gato esté vivo, sabré que las probabilidades complementarias que obtenga para la opción de que el gato esté muerto tendrán lugar en un mundo paralelo. Sin embargo, esto es un razonamiento falaz, pues no es posible establecer una continuidad²⁷ entorno a lo que estoy denominando “mi mundo”. Como hemos apuntado en la página anterior, no parece haber un criterio para confirmar las predicciones, es decir, para ubicarme a mí mismo en alguno de los mundos tras realizar la medición. Una vez abro la caja y el mundo se ramifica en dos, ¿cuál de los observadores (cuál de mis yoes) soy yo? ¿el que está en el mundo 1 observando un gato muerto o el que está en el mundo 2 observando un gato vivo? Ambos siguen siendo yo, y parece que no hay forma alguna de establecer aquí una historia lineal en base a la cuál hay un mundo que a lo largo del tiempo es el mío, y todos los demás son los otros.

Por otro lado, hay quien entiende que la probabilidad no necesita necesariamente ir acompañada de incertidumbre. En palabras de Wallace,

Si podemos decir que el cuadrado del módulo de la amplitud²⁸ funciona exactamente como la probabilidad pero carece de ciertos requerimientos filosóficos

²⁷ Cuando hablamos aquí de continuidad nos referimos a una continuidad desde el punto de vista del sujeto, es decir, continuidad respecto a su historia personal.

²⁸ Esta sería la manera particular de hacer predicciones probabilísticas en mecánica cuántica. Volviendo a nuestro ejemplo recurrente, si nuestro gato está en un estado de superposición $\psi = \alpha\chi + \beta\phi$, la probabilidad de que el gato esté vivo será $|\alpha|^2$ (puesto que χ representa el estado “vivo” y α es su coeficiente correspondiente).

estándar que caracterizan a la probabilidad, depende de nosotros simplemente negar que esos requerimientos filosóficos sean imprescindibles, y adoptar la posición de que en cuanto el cuadrado del módulo de la amplitud funcione exactamente como probabilidad, entonces esto es todo lo que necesitamos para establecer que es probabilidad. (Wallace, 2010, p. 17).

Parte del problema es que ya en el mundo clásico resulta difícil cómo entender la probabilidad. La probabilidad de que algo sea el caso es un valor numérico que atribuimos a ese caso respecto todos los demás casos posibles; cuánto mayor sea el valor atribuido, más probabilidades tendrá ese caso de ser el resultante. Pero, ¿cómo atribuimos ese valor numérico? Entran aquí en juego multitud de factores, además de que a fin de cuentas, la decisión última es arbitraria; podemos tener un dado no cargado tal que cinco de sus caras sean rojas y una verde (siendo casos equiprobables el hecho de que salga cualquiera de las caras), y aun así la verde puede ser perfectamente la cara que salga al tirarlo (aunque la matemática insiste: es menos probable). Hay quien entiende esto como una mera frecuencia; es decir, por mucho que pueda salirnos la cara verde, ni siquiera sólo una vez, sino varias seguidas, si tiramos el dado infinitas veces la experiencia responderá a las predicciones matemáticas (el número de veces que salga la cara verde será la sexta parte de las veces que salga roja). Sin embargo, a nivel técnico esta idea no funciona, puesto que la probabilidad entendida como frecuencia acaba remitiéndonos a la propia probabilidad, sin darnos así un resultado satisfactorio. Además, parece que este enfoque nos remite a un nivel teórico, pero puesto que en la práctica no es posible repetir los experimentos infinitas veces, sigue sin resolverse nada.

Para subsanar esto, otros enfoques como el bayesianismo se centran en relacionar la probabilidad con los grados de creencia del sujeto. Así, se postula un sujeto racional ideal, el cual está dispuesto a apostar una cierta cantidad de dinero en cada experimento probabilístico ajustándose a los axiomas de la probabilidad (es decir, actuando de forma incoherente al participar por ejemplo en apuestas en las que el sujeto perdería con independencia de cuál sea el resultado). Esta idea no termina de funcionar en el universo everettiano, pues por una parte siempre habría (al menos) un mundo en el que el sujeto gana su apuesta, pero según cómo sea el experimento, habrá otros muchos en los que pierde irremediablemente. Sin embargo, esto no es algo que deba preocupar a los defensores de la interpretación de los Muchos Mundos, pues el bayesianismo presenta ya en el mundo clásico numerosos problemas en los que no vamos a entrar.

A raíz de estos planteamientos y las dificultades que presentan, Wallace tratará de afrontar la noción de probabilidad desde la interpretación de Everett, que entiende que puede dar cuenta de la idea incluso mejor de lo que se había hecho en el mundo clásico. Así, Wallace dirá que intuitivamente, podemos relacionar la probabilidad con una cierta noción de simetría. En el caso de que estemos ante un experimento cuyos posibles

resultados sean equiprobables, Laplace definió la probabilidad como el cociente entre el número de casos favorables y el número de los casos posibles. Esta idea se asienta sobre el principio de indiferencia (no hay ninguna razón para que ninguna de las opciones tenga más probabilidades de ser el caso que las demás); sin embargo, podríamos decir que la simetría siempre está rota, pues en último término, una de las opciones será las resultantes y no las demás (entendiendo la probabilidad en su sentido tradicional y ubicando esta situación en el mundo clásico). Esta idea no se aplica bien a un universo en el que sólo hay una historia, pues mantenemos la ficción de que tenemos opciones simétricas, equiprobables, ante los experimentos, cuando en realidad dicha simetría siempre está abocada a romperse.

La situación cambia en el universo everettiano. Volvamos al ejemplo del gato. Recordamos que su estado previo a la medición es $\psi = \alpha\chi + \beta\phi$, de modo que χ representa el estado “vivo” y ϕ representa el estado “muerto”. Ese sería un protocolo, una forma de interpretar los resultados; pero pongamos que tenemos un segundo protocolo para el cual ϕ significa que el gato está vivo y χ que está muerto. Tendríamos por tanto:

Estado del sistema	Protocolo 1	Protocolo 2
χ	Vivo	Muerto
ϕ	Muerto	Vivo

En el universo everettiano, después de medir en el estado $\psi = \alpha\chi + \beta\phi$ (de abrir la caja), no habría colapso y tendríamos un estado de superposición en el que el gato está vivo y muerto a la vez (en mundos diferentes). Si $\alpha = \beta$, sería indiferente haber usado el protocolo 1 o el protocolo 2. Así, si las probabilidades que asigno sólo dependen del estado cuántico, las probabilidades de que el gato esté vivo en un protocolo son idénticas a las probabilidades de que el gato esté muerto en el protocolo contrario, ya que tienen coeficientes iguales. Entonces, si los coeficientes son iguales, el sujeto debería atribuirles la misma probabilidad. Esta es la razón por la que los coeficientes son probabilidades más allá de su forma matemática. Esto no se aplica bien al universo clásico, porque como hemos dicho, allí la simetría siempre está rota. Sólo en la interpretación de los Muchos Mundos sería realmente legítimo pensar que todos los posibles resultados de la medición son iguales, equiprobables, indiferentes entre sí. Tras la medida todos van a tener el mismo destino, no como en el mundo clásico en el que habrá entre ellos una diferencia (opción que resulta ser el caso y todas las demás). Así, citando a Wallace,

La gran mayoría, sino todas, de las probabilidades objetivas que encontramos en la ciencia y en nuestra vida cotidiana en último término tienen su origen en la mecánica cuántica, así que si la interpretación de Everett es correcta, entonces la

mayoría de nuestra experiencia práctica con la probabilidad es probabilidad de tipo everettiano. (Wallace, 2010, p. 16).

7.4. Falsabilidad

Como ya hemos apuntado, aunque la interpretación no lo incluya de forma gratuita, lo cierto es que el planteamiento everettiano se trata de una hipótesis no falsable. Esto quiere decir, que puesto que no es posible que los mundos interaccionen entre sí, nunca vamos a poder probar empíricamente que existen mundos paralelos al nuestro, ya que no tenemos ningún tipo de acceso a los mismos. La interpretación de los Muchos Mundos no prueba la existencia de los mundos, sino que la postula a fin de explicar nuestra experiencia en este mundo (en el que vivimos ahora). Tenemos que suponer que existen otros mundos para explicar por qué el nuestro se comporta como se comporta (o más bien por qué nosotros percibimos dicho comportamiento).

Acorde al falsacionismo de Popper, que resulta clave para el método científico, si una hipótesis no es susceptible de ser refutada no puede ser considerada una hipótesis científica. Estrictamente hablando, esto no significa que la hipótesis no sea verdad, pero no podemos decir que su validez sea respaldada por el estatuto de la ciencia. Claramente esto es un grave problema para la interpretación de los Muchos Mundos, que difícilmente podrá asumir demarcarse de la senda científica cuando ha surgido de ella y todas sus premisas se basan en teorías científicas.

Esta crítica resulta sin embargo discutible, pues no es aplicable exclusivamente a la interpretación de Everett. Difícilmente pasará el criterio falsacionista cualquier otra interpretación de la mecánica cuántica, pues en tanto que son interpretaciones, no remiten a resultados empíricamente comprobables, sino que simplemente ofrecen una explicación adyacente a los mismos. Las interpretaciones no pretenden dar cuenta de una especie de ontología nouménica del mundo, más allá de los resultados empíricos, pues estaríamos aquí ante unas pretensiones casi religiosas. La idea es simplemente ofrecer explicaciones se ajusten a los resultados a fin de que nos permitan comprenderlos. A medida que la ciencia va ofreciendo resultados nuevos, las interpretaciones van cambiando para ajustarse a ellos, y sería necio pensar que debería suceder al revés. Por tanto, es controvertido decir que una interpretación debería ser falsable, pues lo que son falsables son las teorías, en este caso la mecánica cuántica.

8. Implicaciones filosóficas

Hasta ahora hemos visto que la mecánica cuántica rompe con la visión clásica del mundo tal y como lo conocíamos. El problema de la medida pone de manifiesto que la relación entre la realidad y nuestra percepción de ella es aun más compleja de lo que imaginábamos, pudiéndonos hacer llegar a pensar que ambos ámbitos son irreconciliables (nosotros no adoptaremos aquí una postura tan escéptica, al menos no mientras la ciencia siga abriendo rendijas a las que asomarse). Everett tratará de salvar este problema dando una explicación de por qué experimentamos el mundo tal y como lo hacemos, de cómo se relacionan nuestras experiencias con la realidad. Su solución pasará por dar una caracterización compleja del mundo, que estrictamente hablando ya no sería uno sino varios. Sin embargo, al menos en teoría, hemos visto que esta explicación funciona. Para ello hemos de sacrificar la linealidad de la historia tal y como la habíamos concebido, pues con cada medida el mundo se ramifica en base a los posibles resultados de dicha medida, dejándonos al margen de todas las ramas que no son la nuestra, así como de la posibilidad de conocerlas. Parece así que tratando de comprender mejor el mundo, Everett habría postulado que nunca podemos conocerlo del todo²⁹.

En cierta medida, podríamos decir que la interpretación de los Muchos Mundos pone en jaque la noción de causalidad. Si entendemos la causalidad como la sucesión necesaria de eventos futuros respecto a eventos presentes y resulta que nunca podemos conocer del todo los eventos presentes, dicha noción pierde gran parte de su sentido. Everett trunca el acceso epistémico a la mayor parte de la realidad, encerrando al sujeto cognoscente en una historia opaca y dinámica, que evoluciona sin que el sujeto pueda saber cómo. Así, nos resulta imposible conocer en su totalidad el momento presente, siendo por tanto irrelevantes las conexiones que podamos establecer entre dicho estadio y el futuro. Al margen de cómo sucede esto concretamente en la interpretación de los Muchos Mundos, vimos que la causalidad ya quedaba afectada con la propia llegada de la mecánica cuántica. Heisenberg introdujo en la física una profunda incertidumbre, que desde luego no resulta esperanzadora en lo que al progreso científico se refiere. Con el principio de incertidumbre, el principio de causalidad se rompe tal y como lo conocíamos, no porque el futuro no se siga del presente, sino por la imposibilidad de conocer el presente con exactitud. En palabras de Heisenberg

Dado que todos los experimentos responden a las leyes cuánticas y, como consecuencia, las relaciones de incertidumbre, lo incorrecto de la ley de causalidad es una consecuencia bien establecida de la misma mecánica cuántica. [...] Tampoco en principio podemos conocer el presente con todo detalle. Por esta

²⁹ Qué significa conocer por otro lado es un asunto complejo que daría para otro trabajo; quizá Everett sólo nos esté llevando a replantearnos nuestra intuición básica sobre el conocimiento.

razón, todo lo observado es una selección de una multitud de posibilidades y una limitación de lo que es posible en el futuro. (Wheeler y Zurek, 1983, p. 83)

Estaríamos ante una cuestión que no afecta sólo a la interpretación de Everett, sino que es común a todas las interpretaciones. Para autores como Von Neumann, decir que el principio de causalidad es incorrecto será demasiado fuerte, pues la cuántica no deja de ser un filtro que trata de adecuarse a la experiencia, pero no la experiencia en sí. Que algo no cuadre en dicho filtro no significa que no tenga cabida en la imagen del mundo, sino que quizá el filtro es limitado. El propio Von Neumann declaró que

Por supuesto, sería una exageración mantener que nos hemos librado de la causalidad. [...] A pesar del hecho de que la mecánica cuántica está en buen acuerdo con los experimentos, y que nos ha abierto una parte del mundo cualitativamente nueva, uno nunca puede decir de la teoría que está probada por la experiencia, sino sólo que es la recopilación mejor que se conoce de la experiencia. (Jammer, 1974, p. 270)

Esto nos lleva directamente a la posibilidad de conocer del ser humano y de representarse la realidad. Tal y como hemos presentado nuestro recorrido, parece que el principal objetivo de Everett, así como de los físicos que propusieron interpretaciones alternativas, es el de acercarse a la verdad. En principio esto es lo que la ciencia hace, ir desentrañando poco a poco la maraña de apariencias que nos rodean para poder ver el mundo tal cual es, alzándonos por encima de nuestras propias limitaciones para poder observar todo cuanto hay desde un punto de vista objetivo. Sin embargo, en este ascenso hasta la vista de pájaro soñada, a veces nos encontramos con conclusiones que invitan a pensar que el recorrido al que aspiramos es imposible, y que simplemente hay información a la que nunca podremos acceder. Si se trata de conclusiones definitivas o meros obstáculos que la ciencia será capaz de sortear en el futuro, aun no lo sabemos. Sobre lo que sí podemos especular es sobre los objetivos actuales de la ciencia, y qué efectos tienen dichos obstáculos en ellos.

En las secciones segunda y tercera de este trabajo, pudimos ver de forma rápida como la mecánica cuántica fue desarrollándose como teoría gracias al esfuerzo de un gran número de investigadores. Dichos investigadores realizaron aportaciones de índoles diversas, siendo algunas de corte más pragmático e incluyendo otras un carácter propiamente filosófico. A mi modo de ver, la aportación de Everett se inclina más hacia el segundo grupo, pues trata de explicar la experiencia a base de dar una descripción holística del mundo, más allá de la descripción que el observador inserto en él pueda

nunca proporcionar de forma estrictamente empírica³⁰. La ciencia no tiene por qué funcionar necesariamente así, y vemos con frecuencia que el objetivo puede ser dar cuenta de la experiencia y nada más; es decir, tratar de explicar por qué percibimos las cosas tal y como las percibimos en el ámbito inmediato, no apelando a una causalidad trascendente que encierre la respuesta última de cómo es el mundo. A esto aspiran científicos como Bohr, que recordamos que además de dar nombre a su conocido modelo atómico, propuso la noción de complementariedad (a la cual nos referimos en la página 10 a fin de esbozar la interpretación de Copenhague). Dicha noción, de gran relevancia en las interpretaciones más tradicionales de la teoría cuántica, acepta la convivencia de aspectos conflictivos de la teoría, pero no se preocupa por desvelar qué verdad subyace tras ellos. Parafraseando a Bohr

En nuestra descripción de la naturaleza el propósito no es desvelar la verdadera esencia de los fenómenos, sino sólo seguir la pista, tan lejos como sea posible, a las relaciones entre los múltiples aspectos de nuestra experiencia. (Heilbron, 1985, p. 219)

Salvando las distancias, vemos aquí una actitud ante el conocimiento similar a la kantiana, en tanto que se asume el carácter hermético del noumeno, de la esencia de los fenómenos. Para Kant, la experiencia era posible, y no se trataba de una ficción engañosa completamente desligada del noumeno, pero tirar del hilo que une a ambos desde nuestra perspectiva, nunca es posible del todo. Resulta inútil buscar un correlato de los principios del conocimiento en el mundo nouménico, pues este ámbito es incognoscible y por tanto no podemos aplicarle las formas a través de las cuales conocemos el fenómeno. De un modo similar, Bohr vendría a decir que lo que la cuántica revela son relaciones entre conceptos empíricos, pero que esto no significa que dichas relaciones sean la esencia de la realidad. Estaríamos así ante una manera más modesta de entender la ciencia, con aspiraciones más limitadas.

Volviendo a la interpretación de los Muchos Mundos, cabe mencionar que ésta vuelve a un cierto determinismo que no es habitual en la teoría cuántica. Aunque desde nuestro mundo no podamos conocer el estado presente del mundo global en su totalidad, ese estado sería una consecuencia directa de las ramificaciones anteriores que han tenido lugar en los mundos anteriores. Así, volveríamos a la concepción clásica de Laplace de la realidad (no en sentido estricto, por supuesto; tras la mecánica cuántica regresar a un optimismo epistemológico tal se torna imposible), según el cual el estado presente del universo quedaba definido como el efecto de su pasado y la causa de su futuro. Sin embargo, estamos aquí ante un determinismo más frustrante que el que Laplace describía, pues su esperanza era, a partir de la relación causal entre el presente y el futuro, poder conocer el universo al completo si llegáramos a conocer en su totalidad el

³⁰ Al margen de esto, cabe destacar que la interpretación de Everett no introduce mundos con una motivación meramente metafísica, sino que éstos son necesarios para dar cuenta de nuestra experiencia en nuestro mundo, así como de los resultados de la teoría cuántica.

momento presente. Sin embargo, ya hemos dicho que conocer el presente en la interpretación de los Muchos Mundos no es posible, pues como mucho podremos conocer la parcela del universo a la que nuestro mundo se refiere. Así, estaríamos atrapados en una realidad en la que *todo* está determinado a suceder, pero ni siquiera podemos saber cómo.

Entra aquí en juego la noción de libertad. A lo largo de la historia de la filosofía, libertad y determinismo no se han llevado bien, y lo mismo sucede en lo que a la interpretación de los Muchos Mundos respecta. Si asumimos esta forma de entender la cuántica, la historia del universo debería ser completamente reescrita, en tanto que hay múltiples universos en los que el curso de los acontecimientos ha tomado otro camino. Dijimos en la sección cuarta que Everett no decía de forma explícita cuándo se ramifica el mundo ni cómo lo hace³¹, y en las reinterpretaciones posteriores esta cuestión tampoco termina de quedar clara del todo. En principio, hemos dicho que el mundo se ramifica cuándo realizamos una medición cuántica, pero teniendo en cuenta el problema de la medida este criterio no nos resuelve gran cosa. Está claro que dicho escenario se daría en los experimentos mentales que hemos ido nombrando, o casos de experimentación reales que se han dado y se dan para investigar fenómenos cuánticos (el experimento de la doble rendija, por ejemplo). ¿Pero entrarían dentro de este tipo de eventos nuestra actividad neuronal, por ejemplo? El campo de lo cerebral es aun un gran desconocido para nosotros, pero desde luego es un ámbito que se rige por las leyes de lo microscópico y la cuántica tiene mucho que decir al respecto. Si entendemos nuestras decisiones (a nivel cerebral) como eventos cuánticos³², sería posible acorde a la interpretación de los Muchos Mundos que cada vez que tomamos una decisión surja un mundo paralelo en el cual estamos ejecutando la decisión contraria. A nivel global por tanto, todo lo que decidamos sería irrelevante, pues el mundo está determinado a albergar todas las opciones posibles. Se anularía así nuestra libertad, que no sería más que una mera ilusión del sujeto que ignora a todos los yoos paralelos que le rodean. Esto tendría a su vez una repercusión directa en nuestra forma de entender la ética, que siendo consecuentes con la visión everettiana, carecería de sentido. Vemos así que la interpretación de los Muchos Mundos perfila una realidad determinista, en la que las nociones de libertad y moralidad se verían comprometidas.

A todas estas implicaciones cabe objetar que no son más que hipotéticas consecuencias de una visión del mundo que resulta increíble. Sin embargo, no hemos incluido este factor entre nuestras críticas a la teoría, por considerarlo simplemente irrelevante. Que una hipótesis sea contra intuitiva no la hace menos válida, y de ello dan cuenta todos los descubrimientos que la mecánica cuántica ha ido revelando a lo largo del siglo XX. En la antigüedad resultaba igualmente increíble postular que la Tierra es redonda, pero no por ello era menos cierto. La ciencia nos aleja de la visión ingenua de que el mundo es

³¹ De hecho no llega a meterse en la cuestión de la ramificación, que es una aportación de reinterpretaciones posteriores.

³² Lo cual subrayamos que es un escenario posible pero desde luego muy cuestionable.

simplemente tal cual lo vemos, a la vez que progresa en sus intentos de verlo tal cual es. La realidad es un entramado complejo de leyes y relaciones entre fenómenos, las cuales percibimos de manera distorsionada. Sin embargo, el ser humano nunca ha cesado en sus empeños de desenredar este entramado, y de ver algún día qué se oculta bajo esta nebulosa de apariencias. Hasta que podamos obtener una visión más clara, seguiremos caminando entre tinieblas, acercándonos un poco más al conocimiento verdadero.

Bibliografía

ALBERT, D. (1994). *Quantum Mechanics and Experience*. Cambridge: Harvard University Press.

BARRETT, J. A. (1999). *Quantum Mechanics of Minds and Worlds*. Nueva York: Oxford University Press.

HEILBRON, J. L. (1985). "The earliest missionaries of the Copenhagen spirit". *Revue d'histoire des sciences*. Volumen 38, número 3, pp. 195-230. Recuperado desde www.persee.fr/doc/rhs_0151-4105_1985_num_38_3_4005 el 20 de mayo de 2017.

JAMMER, M. (1974). *The Philosophy of Quantum Mechanics: The Interpretation of Quantum Mechanics in Historical Perspective*. Nueva York: Wiley-Interscience.

KENT, A. (1990). "Against Many-Worlds Interpretations". *International Journal of Theoretical Physics* A5, 1764. Recuperado desde www.arxiv.org/abs/gr-qc/9703089 el 28 de abril de 2017.

KRAGH, H. (2007). *Generaciones Cuánticas*. Barcelona: Akal.

RAE, A. I. M. (1986). *Quantum physics: illusion or reality?* Cambridge: Cambridge University Press

TEGMARK, M. (1998). "The Interpretation of Quantum Mechanics: Many Worlds or Many Worlds?". *Fortschritte der Physik*. Noviembre 1998. Volume 46, Issue 6-8, pp. 855-862. Recuperado desde www.arxiv.org/pdf/quant-ph/9709032.pdf el 2 de junio de 2017.

WALLACE, D. (2010). *The Everett Interpretation*. Oxford: Oxford University Press.

WHEELER, J. A. y ZUREK, W. H. (eds.) (1983). *Quantum Theory and Measurement*. Princeton: Princeton University Press.