HUMAN REVIEW | Vol. 16, No. 1, 2023 | ISSN 2695-9623
International Humanities Review / Revista Internacional de Humanidades
DOI: https://doi.org/10.37467/revhuman.v16.4782

EL PROBLEMA DE INCOHERENCIA EN LA INTERPRETACIÓN DE LOS MUCHOS MUNDOS DE LA MECÁNICA CUÁNTICA

The Incoherence Problem in the Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics

MARÍA RUBIO JUAN
Universidad Rey Juan Carlos, España

KEYWORDS

Philosophy of physics
Quantum mechanics
Many Worlds
Interpretation
Probability
Incoherence problem
Quantitative problem

ABSTRACT

The Many Worlds Interpretation of Quantum Mechanics has been faced since its conception with the problem of how to reconcile the probabilistic nature of quantum theory with a deterministic description of the Universe in which all possibilities are actualised. This paper seeks to present the status of the problem through the solutions proposed by Lev Vaidman and David Deutsch and to relate them, as well as to present probability as an epistemological postulate, in accordance with the subjectivistic interpretation.

PALABRAS CLAVE

Filosofía de la física
Mecánica cuántica
Interpretación de los muchos mundos
Probabilidad
Problema de incoherencia
Problema cuantitativo

RESUMEN

La Interpretación de los Muchos Mundos de la Mecánica Cuántica se enfrenta desde su origen al problema de cómo reconciliar la naturaleza probabilística de la teoría cuántica con una descripción determinista del Universo en la que todas las posibilidades se actualizan. En este trabajo se busca presentar la situación del problema a través de las soluciones propuestas por Lev Vaidman y David Deutsch y ponerlas en relación, además de plantear la probabilidad como un postulado epistemológico de acuerdo con su interpretación subjetivista.

Recibido: 02/ 01 / 2023
Aceptado: 27/ 02 / 2023

1. Introducción

Los tres pilares básicos de la mecánica cuántica llamada *ortodoxa* son el principio de complementariedad de Bohr, las relaciones de incertidumbre de Heisenberg y el postulado de probabilidad de Born (Pérez Marcos, 2020). En este trabajo nos centraremos en el último de ellos, considerando su ámbito de aplicabilidad en la interpretación determinista de los muchos mundos.

En 1925 Erwin Schrödinger presentó la famosa ecuación de onda que hoy en día lleva su nombre, por la que recibió el Premio Nobel de Física en 1933, y que responde a la hipótesis de la existencia objetiva de ondas con un comportamiento comprensible y causal (Schrödinger, 2001). Muchos físicos, entre ellos De Broglie y Einstein, aceptaron esta ecuación por la comodidad del elemento realista y continuo que introducía (Arana, 2002, 2012), contrario a las características discontinuidades cuánticas y a la mecánica matricial propuesta por Heisenberg poco tiempo antes, aunque más tarde Dirac demostraría que ambas teorías son equivalentes. Poco tiempo después, en 1926, Born hizo una de sus contribuciones principales al desarrollo de la teoría cuántica, su interpretación probabilística de las ondas de Schrödinger (Pérez Marcos, 2020). En su interpretación, sitúa la probabilidad como protagonista y deja considerablemente indeterminado el comportamiento del sistema, facilitando así la entrada a la descripción acausal característica de la mecánica cuántica (Selleri, 1986), de tal forma que la función de onda[1] no es el electrón mismo, sino que únicamente describe dónde puede encontrarse; expresa, por tanto, toda la información que puede obtenerse, en un instante dado, sobre la partícula (Cassinello y Sánchez, 2012).

> […] las predicciones ya no son «deterministas», en el sentido de que «la partícula observada hoy y aquí estará mañana en tal o cual lugar»; sino que serán «estadísticas»; «la probabilidad de que la partícula esté mañana en tal o cual lugar, vale tanto». (Born, 1960, p. 168, como se citó en Pérez Marcos, 2020, p. 144)

Schrödinger se mostró contrario a la interpretación estadística de Born, aunque sí sería la que perduraría, por lo que tuvo que presenciar cómo «su función de ondas venía a significar algo así como una suma ponderada de posibilidades, lo cual parecía corresponder más bien al orden del conocimiento que al del ser» (Arana, 2002, p. 19). Aunque entre 1928 y 1933 el físico aceptó la interpretación probabilística, tras este periodo, Schrödinger no volvió a mostrarse resignado a asumir la formulación de las escuelas de Copenhague y Gotinga, y el fruto de sus conversaciones con Einstein fue la formulación de la paradoja del gato de Schrödinger.

Por otro lado, con el llamado «problema de la medida» nos enfrentamos a preguntas como: ¿En qué momento se produce el colapso de la función de onda? ¿La función de onda representa la realidad o el conocimiento que tenemos de ella? Llamamos «interpretaciones epistémicas» a aquellas que toman la ecuación de Schrödinger en el sentido en el que fue interpretada por Max Born y el resto de físicos de la interpretación ortodoxa o de Copenhague, es decir, como la representación del conocimiento que podemos obtener de una partícula. Sería, en palabras de DeWitt (1970), únicamente «un algoritmo matemático para hacer predicciones estadísticas» (p. 152). Según dicha interpretación, basta con que el experimento nos permita averiguar la trayectoria del fotón para que este siga una única ruta, de modo que la naturaleza del experimento fuerza un comportamiento u otro en la partícula subatómica (Bohr, 1927). Como vemos, esta interpretación concede un papel protagonista al observador y su conocimiento, a la información que el sujeto puede extraer del sistema. Renunciamos entonces al conocimiento de la naturaleza o la realidad en sí en favor de una interpretación probabilística, pero que representa todo lo que podemos conocer del mundo atómico, siendo el colapso una mera actualización de nuestro conocimiento. «Probablemente, el motivo por el que la interpretación de Bohr no tiene ya seguidores, es porque renuncia a cualquier visión e intelección ontológica de la realidad» (Gherab Martín, 2020, p. 469).

En el lado contrario encontramos las interpretaciones que podemos llamar «ontológicas», aquellas que toman la ecuación de onda de Schrödinger como una descripción objetiva de la realidad física y no solo de nuestro conocimiento, es decir, recuperan el valor ontológico a la función de onda. Esta postura es la que mantienen tanto la interpretación de la onda-piloto de David Bohm y Louis de Broglie como

[1] La ψ —la función de onda— simboliza una magnitud continua, «cuya evolución espaciotemporal era perfectamente gradual y estaba completamente predeterminada por la ecuación que lleva el nombre de su descubridor» (Arana, 2012, p. 24).

la de los muchos mundos, propuesta originalmente por Hugh Everett en 1957 bajo el nombre de «formulación del estado relativo», acuñada como «interpretación de los muchos mundos» por Bryce DeWitt en 1970. Esta interpretación, en su versión más simple y cercana a la original, nos presenta una realidad descrita en términos de un universo o mundo que se bifurca, cada vez que realizamos una medida, en una infinidad de universos o mundos paralelos casi idénticos, por lo que existirían también infinitas copias de nosotros mismos. Para ello, sus defensores prescinden del llamado «colapso de la función de onda» y extienden la superposición a la totalidad de lo real, de forma que todas las posibilidades son llevadas a la existencia, cada una en un mundo o universo distinto. Nos ocuparemos de esta interpretación en el siguiente apartado.

Más tarde, en el apartado tres, expondremos el planteamiento general del problema de la probabilidad, que trata la aplicabilidad o no del concepto ordinario de probabilidad en una interpretación en la que todas las posibilidades se actualizan. Con la finalidad de resultar coherente y consistente con las evidencias experimentales, la propuesta de Everett y sus diversas reformulaciones requieren de una interpretación de las probabilidades, o al menos algo semejante al cálculo probabilístico. Podemos dividir este problema en dos partes: el problema de incoherencia por un lado, y el cuantitativo por otro; el primero es más general y responde a la cuestión acerca del sentido que puede o no tener hablar de probabilidad en un universo determinista, y el segundo problema, que aquí hemos considerado casi como una consecuencia del primero, gira en torno a la posibilidad de derivar la regla de probabilidad de Born en la interpretación de los muchos mundos.

En este mismo apartado analizaremos las propuestas de solución de Lev Vaidman y David Deutsch —cuya prueba amplía y esclarece David Wallace— y sus implicaciones epistemológicas. Mientras que Vaidman aborda el problema de una manera más general, centrándose en la primera parte del problema y sin entrar en disquisiciones o pruebas matemáticas muy precisas, Deutsch se ocupará de elaborar una solución al problema cuantitativo, la llamada «prueba de Deutsch» a partir de la teoría de la decisión clásica. Habiendo expuesto y analizado ambas propuestas, en las conclusiones valoraremos en qué medida está justificada esta probabilidad subjetiva que se introduce en la interpretación de los muchos mundos en forma de postulado epistemológico, y veremos el modo en que sería posible establecer una conexión entre ambas formulaciones, pues parece que, aunque el punto de partida no es el mismo, la terminología resulta muy similar y el fin último es la sustitución del concepto ordinario de probabilidad por uno que gire en torno a las acciones racionales de los individuos.

La hipótesis que trataremos de verificar o falsar en este trabajo es que, a pesar de que el problema no tiene todavía una respuesta unánime, las soluciones de Vaidman y Deutsch son compatibles terminológicamente en cierta medida, y posiblemente idénticas en la práctica, a falta de establecer la correspondencia de cada uno de los elementos de estas propuestas con el formalismo matemático de la mecánica cuántica. Así pues, nuestro objetivo principal es mostrar uno de los mayores retos a los que se enfrenta la interpretación de los muchos mundos y la situación en la que se encuentra el problema de incoherencia y, por añadidura, el cuantitativo. Además, se pretenden presentar y esclarecer los términos que Vaidman y Deutsch utilizan en sus respectivos intentos de solución al problema, así como poner de relieve el debate existente entre ambas propuestas y entenderlas en el marco de la interpretación subjetiva de la probabilidad.

2. La formulación del estado relativo de Everett

La formulación del estado relativo nace con la intención de resolver los problemas derivados de la reducción del paquete de ondas de la interpretación ortodoxa o de Copenhague. Everett parte de la idea de que no encontramos nada en la ecuación de Schrödinger que obligue a la función de onda a colapsar únicamente en una de sus posibilidades. ¿Por qué si en la ecuación de Schrödinger deben subsistir las posibilidades de detectar que la partícula ha atravesado tanto la rendija derecha como la izquierda, tras la medición solo podemos detectarla en uno de los dos estados? Decíamos que, según la interpretación ortodoxa, una vez hecha la medida, la ecuación de Schrödinger queda violada para dar paso a la reducción del vector estado. Esta contradicción entre el mundo cuántico y lo que realmente observamos llevó a von Neumann a elaborar en 1932 una teoría de la medición en la que se admiten dos procesos; uno de ellos es continuo y determinista y tiene lugar cuando el sistema todavía no ha sido medido ni observado y evoluciona según la ecuación de Schrödinger; el segundo, por el contrario, es discontinuo y tiene lugar cuando el sistema colapsa al ser observado en uno de los estados de la superposición lineal (Cassinello, 1994; Everett, 1957). Con la interpretación del estado relativo de

Everett, que posteriormente pasó a llamarse de los «Muchos Mundos» o «muchos universos» (DeWitt, 1970; DeWitt y Graham, 1973), nos adentramos en una teoría del «no-colapso», una solución radical en la que no se produce ningún tipo de reducción del paquete de ondas en el momento de la medida.

Si adoptamos la interpretación ortodoxa nos encontramos además con otra problemática, según nos dice Everett, pues en mecánica cuántica estamos hablando de sistemas cerrados, pero, al mismo tiempo, para que pueda darse el paso del estado de superposición a un estado «clásico», la interpretación ortodoxa hace intervenir a un observador externo, que es el agente del colapso de la función de onda. Por tanto, el proceso de observación está más allá del propio formalismo de la teoría, lo que hace imposible su universalidad y completitud (Sánchez Gómez, 2000). La idea de Everett —o más bien la idea de la versión de DeWitt— parte del hecho de que el sistema cerrado por excelencia es el universo, ya que en él no cabe encontrar observadores externos que puedan hacer colapsar la función de onda ni entornos todavía más grandes con los que se pueda producir una situación de decoherencia (Cassinello y Sánchez, 2012; Sánchez Gómez, 2000), por lo que si aplicamos los principios de la mecánica ondulatoria de Schrödinger al universo, podremos afirmar que, efectivamente, hablamos de una teoría completa. Fueron Wheeler y DeWitt quienes años más tarde utilizaron la denominación «Muchos Mundos» para referirse a la interpretación de Everett (DeWitt y Graham, 1973) tras darse cuenta de sus implicaciones en el ámbito de la cosmología.

Everett no era contrario a la interpretación ortodoxa, sino que, simplemente, no le pareció aceptable que los observadores fueran externos al sistema, y para incluirlos tuvo que prescindir del colapso —de hecho, la propuesta de Everett no fue una reacción a la interpretación de Copenhague, sino a la de Eugene Wigner (DeWitt, 1970; Barrett, 2018)—. Su objetivo era mostrar que los registros de las observaciones realizadas por el observador en una mecánica cuántica sin colapso coinciden, hasta cierto punto, con los predichos por la interpretación de Copenhague en la que se incluye el colapso (Barrett, 2018), de modo que la interpretación cumpliría con la condición de mantenerse fiel al formalismo matemático de la teoría, incluso en lo que al cálculo de probabilidades se refiere.

Se denomina «estado relativo» porque:

> A cualquier estado arbitrariamente elegido para un subsistema, corresponderá un estado relativo único para el resto del sistema compuesto. Este estado relativo dependerá normalmente de la elección de estado para el primer subsistema. Así, el estado de un subsistema no tiene una existencia independiente, sino que está fijado únicamente por el estado del subsistema restante. (Everett, 1957, p. 454)

Esto es, la «transición de lo posible a lo real» de la que hablaba Heisenberg se da porque el universo se divide en dos copias, en una de ellas la partícula habría atravesado la ranura derecha, mientras que en la otra copia atravesó la izquierda, siguiendo el ejemplo del experimento de la doble rendija. A su vez, encontramos también una superposición de los estados del observador, quien en cada universo obtendrá un resultado u otro de sus observaciones, el cual dependerá de la alternativa del primer subsistema —las rendijas— que esté teniendo lugar en su copia del universo, por lo que el sistema y el observador dejarían de existir como entes independientes y pasarían a estar «correlacionados» (Everett, 1957). El estado del mundo en el instante inicial estaría entonces representado como sigue:

$$|\Psi_0\rangle = |\chi\rangle|\varphi\rangle \tag{1}$$

Donde $|\chi\rangle$ representa el sistema y $|\varphi\rangle$ el aparato —u observador— (DeWitt, 1970).

Además, si un sistema se encuentra en una superposición de *n* estados cuánticos, *n* serán también las copias de mundos que resulten de la medida. Es por esto que, mientras el estado cuántico del mundo es el producto del estado macroscópico definido de los objetos que se encuentran en él multiplicado por el estado cuántico de las partículas que no constituyen *objetos* (2), el estado cuántico del Universo viene dado por la superposición de mundos (3), como se expresa a continuación (Vaidman, 2019, 2021):

$$|\Psi_{mundo}\rangle = |\psi_{objeto\,1}\rangle\, |\psi_{objeto\,2}\rangle\, |\psi_{objeto\,3}\rangle\, \ldots\, |\psi_{objeto\,n}\rangle\, |\Phi\rangle \tag{2}$$

$$|\Psi_{universo}\rangle = \textstyle\sum_i \alpha_i\, |\Psi_{mundo}\rangle_i \tag{3}$$

Si esto es así, «debemos aceptar que hay realmente una infinidad de "mundos paralelos" coexistiendo con el que vemos en cada instante. Además, hay una infinidad de individuos más o menos idénticos a nosotros habitando esos mundos. Es una idea ciertamente rara» (Davies y Brown, 1989, p. 53). En definitiva, de lo que se trata es de prescindir del proceso referente a la observación —el colapso— y aceptar la validez universal de la ecuación de Schrödinger, por lo que la probabilidad ya no será un postulado *a priori*, sino que es trasladada al nivel subjetivo (Cassinello, 1994), pues, según nos dice DeWitt (1970), «el colapso del vector estado y la asignación de pesos estadísticos no se sigue de la ecuación de Schrödinger» (p. 159). Los defensores de la teoría concluyen que, sin postular ningún principio matemático o metafísico adicional, «el formalismo de la teoría cuántica es capaz de producir su propia interpretación» (DeWitt, 1970, p. 160). Este es el llamado «metateorema EWG», por Everett, Wheeler y Graham. Para probarlo, sus proponentes nos dicen que para probarlo solo debemos hacernos dos preguntas: ¿cómo puede la interpretación probabilística emerger del formalismo mismo? Y ¿cómo puede ser alcanzada la correspondencia con la realidad si no se produce el colapso? (DeWitt, 1970). Everett mantuvo también que, a partir del formalismo de su teoría y utilizando un método propuesto por Neil Graham, es posible obtener el mismo cálculo de probabilidades que en la interpretación de ortodoxa, aunque esta tesis será rechazada por los físicos encargados de reformular la propuesta (Cassinello, 1994).

Mientras que en la interpretación de Copenhague era el sistema el que se veía afectado por cada nueva observación, en esta interpretación es el observador el que depende del sistema, por lo que nos encontramos ante una teoría que trae de vuelta el determinismo y el realismo tanto en sentido ontológico como epistemológico.

> La interpretación de Everett resuelve las paradojas inherentes a la articulación de la ecuación de Schrödinger con la intervención de un observador, pero introduce, a cambio, un mundo bastante extraño en el que un observador se divide instantáneamente en múltiples copias de sí mismo. (Cassinello, 1994, p. 55)

Es por esto que Penrose (1991) sugiere que antes incluso de poder confrontar la interpretación de los muchos mundos con nuestra experiencia ordinaria, es necesaria una teoría de la consciencia. Ante tal afirmación, David Deutsch dirá que «la interpretación funcionará antes incluso de que tengamos un conocimiento exacto acerca de qué es la conciencia. El resto de interpretaciones no funcionarán propiamente hasta que no entendamos qué es la conciencia» (Davies y Brown, 1987, p. 122). La de Penrose es una de las muchas objeciones que se han hecho a la teoría desde su surgimiento, entre las que encontramos los problemas con la probabilidad, la «economía» de los universos o la dificultad para verificarla.

Tras la propuesta original de Everett se han llevado a cabo numerosas formulaciones, de entre las cuales la más conocida sea quizás la de DeWitt; no obstante, en este caso nos centraremos en la formulación de los muchos mundos de Lev Vaidman y la del multiverso (en adelante, MVT) de David Deutsch. Este último utilizará «multiverso» para referirse al «universo» de la *Many Worlds Interpretation* (en adelante, MWI) y «universos paralelos» en lugar de «muchos mundos», además de postular que los universos no se crean cada vez que realizamos una medida o tomamos una decisión, sino que le parece más adecuado contemplar esto de tal forma que el número —infinito— de universos sea siempre constante.

> Esto es, hay siempre el mismo número de universos. Antes de hacer una elección o decisión, en la que es posible más de un resultado, todos los universos son idénticos, pero una vez hecha la elección, se dividen en dos grupos, y en un grupo sucede un resultado y en el otro grupo otro resultado. Normalmente esos dos grupos no se afectan entre sí en adelante, pero en algunas ocasiones sí lo hacen. (Davies y Brown, 1987, p. 116)

Las aproximaciones de Vaidman y Deutsch al problema de incoherencia, como veremos, también presentan grandes diferencias y, sin embargo, conceptualmente y en cuanto a su finalidad, no resultan tan lejanas.

3. La probabilidad en la interpretación de los muchos mundos

Aunque hay consenso en cuanto a la exactitud de las predicciones estadísticas de la teoría cuántica, no lo hay respecto a qué interpretación puede considerarse correcta (McQueen y Vaidman, 2019). Esto es debido a que, al querer hacer de la teoría cuántica una descripción completa de la realidad, nos encontramos con una dificultad, y es que, a pesar de que la ecuación de Schrödinger se corresponde con la superposición de todos los posibles resultados tras la medida en un experimento, en nuestra experiencia ordinaria solo observamos uno de esos resultados, por lo que nos vemos obligados a introducir la hipótesis, que Vaidman (2019) califica como *ad hoc*, del colapso de la función de onda para conectar el formalismo de la teoría con la experiencia. «El colapso, con su aleatoriedad, su no-localidad y la falta de momento bien definido, es una cicatriz desagradable en la teoría cuántica» (Vaidman, 2010, p. 1). En la misma línea dirá DeWitt (1970) que:

> La interpretación convencional de la mecánica cuántica confunde dos conceptos que en realidad deberían ser distintos: la probabilidad en relación con la mecánica cuántica y la probabilidad tal como se entiende en mecánica estadística. La mecánica cuántica es una teoría que intenta describir en lenguaje matemático un mundo en el que el azar no es una medida de nuestra ignorancia, sino que es absoluto. Debe conducir inevitablemente a estados [...] que sufren una fisión múltiple, correspondiente a los muchos resultados posibles de una medición dada. Este comportamiento está integrado en el formalismo. Sin embargo, precisamente porque el azar cuántico no es una garantía de nuestra ignorancia, no deberíamos alterar el vector de estado al adquirir nueva información como resultado de una medición. El obstáculo para adoptar una visión tan elevada de las cosas es que nos obliga a creer en la realidad de todos los mundos simultáneos representados en la superposición. (pp. 160-161)

La MWI está conformada por dos partes: una primera teoría que nos proporciona la evolución temporal del estado cuántico del Universo, y una segunda parte constituida por una descripción que establece la correspondencia entre el estado cuántico del Universo y nuestra experiencia ordinaria (Vaidman, 2019). Mientras que la primera parte es objetiva y no entraña ningún problema de naturaleza matemática ni filosófica, la segunda resulta más problemática, pues nuestra experiencia no es rigurosa, y nuestro lenguaje tampoco (Vaidman, 2019, 2021).

El tipo de ambigüedades tratadas en estas líneas se deben a que tanto la mecánica cuántica ordinaria como la propuesta originalmente por Everett son buenas solo «para todos los propósitos prácticos» (FAPP)[2], es decir, son soluciones pragmáticas. En otras palabras, al utilizar conceptos como «objeto» o «medida», entre otros, no estamos utilizando un lenguaje rigurosamente definido, por lo que en su día muchos físicos se centraron en dar con una mecánica cuántica rigurosa. La MWI, según Vaidman, posee fundamentos rigurosos para la primera parte de la teoría, la parte física, mientras que la parte correspondiente a la experiencia, aunque ha introducido mejoras con respecto a los de Copenhague, sigue siendo una aproximación FAPP. Esto mismo es lo que sucede con el problema de incoherencia, pues aunque utilicemos el mismo término, —«probabilidad»— y debamos llegar a la famosa regla de probabilidad de Born, el significado no puede ser el mismo en una interpretación como la de Copenhague en la que esta probabilidad tiene lugar antes de la medida —es, podríamos decir, un postulado ontológico—, que en una interpretación en la que, dado que todas las posibilidades son llevadas a la existencia, la probabilidad entra en juego, al menos según la argumentación de Lev Vaidman, como medida de la ignorancia del sujeto, pues se da *a posteriori* —este sería, al contrario que el anterior, un postulado epistemológico—. No estarían de acuerdo con tal afirmación ni David Deutsch ni David Wallace, para quienes sí es posible un tipo de probabilidad asociada a la incertidumbre subjetiva anterior a una medida.

Siguiendo de nuevo a Vaidman (2012), hemos escogido tres posibles escenarios conceptuales para explicar lo que sucede en una medida cuántica. El primer escenario es el que nos presenta la interpretación ortodoxa, tratada con anterioridad en este trabajo. El segundo escenario nos muestra una descripción de la evolución de la función de onda determinista y sin colapso, pero que defiende que la teoría cuántica es una teoría incompleta; este sería el caso de las teorías de variables ocultas y,

[2] Por la abrevitura del inglés de «For All Practical Purposes».

en la medida en que estas son desconocidas para el experimentador, la probabilidad tendrá que ver únicamente con la incertidumbre, «su concepto de probabilidad es: la probabilidad de que A suceda es la probabilidad de que las variables ocultas sean ahora tales que A tenga lugar» (Vaidman, 2012, p. 300). El tercer escenario, el de la MWI, defiende una interpretación determinista y sin colapso, pero, a diferencia de la anterior, en este caso la función de onda es considerada como la descripción completa del sistema. El problema comienza a avistarse, pues ¿en qué medida podemos hablar de probabilidad en la MWI si todos los resultados son llevados de la potencia al acto? ¿Qué sentido tiene seguir anclados en el probabilismo ontológico de la interpretación ortodoxa? Este problema u objeción es el llamado «problema de incoherencia» (*incoherence problem*) de la MWI. «En el Universo con colapso hay un concepto de probabilidad genuina de acontecimientos aleatorios. En el Universo de la MWI hay una evolución determinista y no una probabilidad objetiva» (Vaidman, 2012, p. 302).

Podemos distinguir tres maneras de interpretar la probabilidad. La primera de ellas es la concepción lógico-inductiva, según la cual los enunciados probabilísticos tratan de relaciones lógicas entre proposiciones; en segundo lugar, la concepción subjetivista de la probabilidad toma en consideración la probabilidad como un estado de creencia del sujeto, es decir, no está relacionada con el mundo, sino con el estado epistémico del individuo, por lo que la probabilidad sería una muestra de ignorancia y estaría siempre condicionada al descubrimiento de nuevas evidencias; por último, la concepción objetivista y/o frecuencialista sí considera que la probabilidad está relacionada con hechos empíricos, con el mundo, independientemente del sujeto cognoscente (Díez y Moulines, 1999). Lo que podemos afirmar con seguridad es que en la MWI no podemos hablar de probabilidad objetiva, con lo que la duda surge en tanto que si este modo de entender la probabilidad forma parte de las interpretaciones logicistas o subjetivistas. Ambas interpretaciones coinciden en que la probabilidad representa la relación entre una aserción y un cuerpo de evidencia, además de que el sujeto debe ser consistente y asignar un grado de creencia acorde con la evidencia de la que dispone. No obstante, en la interpretación subjetivista nos encontramos con una lógica de escala continua en la que el número entre cero y uno que representa el «grado de creencia» y la distribución de estas creencias no están determinadas, sino que dependen del conocimiento del individuo. Y, por último, aunque en ambas interpretaciones la consistencia es un criterio indispensable, los subjetivistas añaden un criterio adicional, y es que los sujetos deben ser también «coherentes» —o racionales— en sus apuestas.

A pesar de la cierta similitud que existe entre estas dos interpretaciones de la probabilidad, como veremos, tanto Vaidman como Deutsch se encuentran más cercanos al marco teórico desarrollado por los subjetivistas. Así pues, sobre todo en el caso de Deutsch, que es quien se ocupa de la prueba matemática, se sirve de conceptos como el «grado de creencia» introducido por Jakob Bernoulli (1713) en su *Ars conjectandi*, la «utilidad esperada» de Frank Ramsey (1926) —desarrollada posteriormente por von Neumann y Morgenstern— o el «método de la apuesta» de Emile Borel (1939), que encontramos en *Valeur pratique et philosophie des probabilités,* y que también parece tomar Vaidman.

Teniendo en cuenta lo dicho hasta el momento, y dado que esta interpretación —a la que Deutsch (1997) da incluso la categoría de «teoría», la MVT— se halla comprometida con lograr establecer la correspondencia entre el formalismo matemático y nuestra experiencia, sus defensores se han ocupado de llevar a cabo esta tarea también en lo concerniente a la probabilidad. Varias serán las propuestas para conseguir llegar a la regla de probabilidad de Born desde la interpretación de Everett. Vaidman, por su parte, introduce conceptos como «la probabilidad de localización subjetiva» («*probability of self-location*»), «la medida de existencia de un mundo» («*measure of existence of a world*»), «el principio de comportamiento» («*behavior principle*»), o la regla de Born-Vaidman, en un intento de derivar la regla de Born de tal forma que la probabilidad en ambas interpretaciones coincida numéricamente (Greaves, 2004; Wallace, 2003) —lo cual responde al problema cuantitativo (*quantitative problem*)—. En el caso de Deutsch, sin embargo, veremos que se parte del supuesto de que no es necesario hablar de probabilidad objetiva en el multiverso para que la regla de Born pueda cobrar sentido en la teoría (Deutsch, 1999; Wallace, 2003; Dawid y Thébault, 2014).

> Mi objetivo es probar algo que es convencionalmente tomado como axiomático (el axioma probabilístico de la teoría cuántica) desde otras cosas que son convencionalmente tomadas como axiomáticas pero que no refieren a la probabilidad, a saber, la teoría cuántica y la teoría de la decisión, ambas despojadas de sus axiomas probabilísticos. (Deutsch, 1999, p. 3130)

Para ello, Deutsch recurre a la teoría de la decisión clásica y a varios postulados, entre ellos lo que llama la «regla de suma cero» («*zero-sum rule*»), la sustitutividad (*substitutivity*) o la aditividad (*additivity*). David Wallace hará aportaciones a la propuesta de Deutsch apelando al formalismo matemático de la teoría y la formulación del estado relativo de Everett, relacionándola con una cierta noción de simetría (Wallace, 2011). Su aproximación será conocida por algunos físicos como «de Deutsch-Wallace» (Dawid y Thébault, 2014).

3.1. Lev Vaidman: probabilidad de localización subjetiva

Llamamos «probabilidad subjetiva», «probabilidad de tipo ignorancia» o «ilusión de probabilidad» (Vaidman, 1998; 2012) al concepto de probabilidad aplicable a la MWI. Para ilustrar su propuesta, Lev Vaidman propuso considerar el problema de la Bella Durmiente (*The Sleeping Beauty Problem*) desde la interpretación de los muchos mundos. Este problema tiene varias formulaciones[3]. Para el propósito de este trabajo, bastará con exponer, simplificada, la versión que consideramos más sencilla y que nos permitirá explicar a partir de ella los conceptos que introduce Vaidman para defender su aproximación.

Imaginemos que una Bella Durmiente se encuentra en una habitación con el experimentador, quien le da una pastilla para dormir que, además, le hace no poder recordar nada. El experimentador lanza una moneda: si sale cara, la Bella Durmiente será despertada solo el lunes, mientras que si sale cruz lo hará lunes y martes, sin recordar nada de lo sucedido una vez vuelve a dormir. Lanzar la moneda se correspondería en este caso con lo que en la interpretación ortodoxa llamábamos «realizar una medición». Sin embargo, esta afirmación no sería compartida por todos los físicos que se han encargado del desarrollo de la MWI, pues, por ejemplo, David Wallace o Wojciech H. Zurek serán de la opinión de que la división de mundos se produce debido por decoherencia cuántica —pérdida de la superposición por el entorno—, mientras que Vaidman (2021; McQueen y Vaidman, 2019) argumenta que la decoherencia no juega ningún papel en la interpretación, sino que la división —o ramificación— se produce en el mismo instante en el que en la interpretación de Copenhague se daba el colapso; la diferencia estriba en que, mientras que la de von Neumann es una propuesta epistémica, la de la MWI es ontológica (Vaidman, 2010, 2019, 2021). El problema es que, desde esta última perspectiva, nos encontramos con los mismos interrogantes a los que se tuvo que enfrentar la interpretación de Copenhague, como determinar qué constituye exactamente una medida o qué diferencia físicamente una medida de otro tipo de interacción (Sánchez Gómez, 2000). A pesar de ello, Vaidman (2019) nos dice que la «vaguedad de la división de mundos es mucho menos problemática que la vaguedad de la respuesta a la cuestión sobre cuándo se produce el colapso» (p. 99).

En cualquier caso, volviendo a la Bella Durmiente, cada vez que el experimentador la despierta, le pregunta acerca de la probabilidad de que el resultado haya sido «cara» (Vaidman, 2001). La respuesta entre los físicos no es clara; Peter Lewis (2007)[4] argumenta que la respuesta de la Bella Durmiente debe ser 1/2; por el contrario, Adam Elga y Lev Vaidman afirman que la solución correcta es 1/3. En este último caso, podemos extraer dos funciones de onda, una para el lunes y otra para el martes (Groisman, Hallakoun y Vaidman, 2013). La del lunes sería como sigue:

$|\Psi\rangle_{Lunes} = \frac{1}{\sqrt{2}}\big|cara,$  $\big\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}\big|cruz,$  $\big\rangle$ (4)

Esto se debe a que la Bella es despertada tanto si sale cara como si sale cruz, mientras que en la del martes observamos que la Bella solo se despertará si sale cruz:

$|\Psi\rangle_{Martes} = \frac{1}{\sqrt{2}}\big|cara,$  $\big\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}\big|cruz,$  $\big\rangle$ (5)

donde  significa «dormida» y  significa «despierta».

[3] Para las distintas formulaciones del Sleeping Beauty Problem (SBP) véase Groisman, Hallakoun y Vaidman (2013) y Vaidman (2001).

[4] Aunque no es nuestra intención profundizar en la postura de Lewis, tal vez sí sea necesario apuntar que su cálculo de probabilidad contiene, según el análisis de Vaidman (2001), algunas inconsistencias. El desacuerdo parece deberse también a que Lewis comparte la posibilidad de encontrar un tipo de probabilidad que se dé antes de la ramificación, igual que David Wallace o Simon Saunders, postura rechazada por Vaidman (1998).

Así pues, e incluso sin necesidad de tener que realizar el cálculo probabilístico, vemos que los tres resultados posibles son: «lunes + cara», «lunes + cruz» y «martes + cruz»; esto es, la probabilidad de obtener cara es 1/3 y la de obtener cruz 2/3. Este debate tendrá relevancia sobre todo cuando abordemos la «medida de existencia de un mundo». Es importante subrayar que a la Bella Durmiente no se le está preguntado por algo que va a ocurrir —como podría ser: ¿qué probabilidad hay de que al lanzar la moneda vaya a salir cara?—, sino por algo que ya ha ocurrido —¿cuál es la probabilidad de que mientras dormías haya salido cara al lanzar la moneda?—, por lo que, avanzando lo que veremos a continuación, con esta imagen se busca justificar que, en un mundo plenamente realizado, también se pueden postular hipótesis sobre el grado de probabilidad, aunque dicha probabilidad esté sustentada no en un proceso físico, sino en la ignorancia del sujeto.

La probabilidad es de incertidumbre o de ignorancia no porque el sujeto desconozca el estado cuántico del sistema, pues un «creyente» de la MWI sabe que todas las posibilidades existen, sino que la incertidumbre guarda relación con la localización subjetiva, «el postulado concierne a la probabilidad subjetiva *para un observador* de vivir en un mundo particular» (McQueen y Vaidman, 2019, p. 15). Por ello, no tendría sentido preguntarle a la Bella Durmiente la probabilidad de que el resultado del lanzamiento de la moneda sea «cara» antes de lanzarla, pues tanto el resultado «cara» como el resultado «cruz» son reales, aunque en distintos mundos, y ella es el *ancestro* de sus *descendientes* en ambos mundos.

> En el momento presente hay muchos "Lev" diferentes en diferentes mundos (no más de uno en cada mundo) [...] Tengo un pasado particular, bien definido: correspondo a un "Lev" particular en 2020, pero no a un "Lev" particular en el futuro; correspondo a una multitud de "Levs" en 2030. Esta correspondencia se ve en mi recuerdo de un pasado único: un "Lev" en 2021 comparte recuerdos con un "Lev" particular en 2020, pero con múltiples "Lev" en 2030. (Vaidman, 2021, párr 12)

Además, dado que si la Bella Durmiente viera el resultado del lanzamiento de la moneda podría asignar, por ejemplo, una probabilidad 0 de encontrarse en un mundo en el que el resultado ha sido «cara» y 1 al mundo en el que se ha obtenido «cruz», se hace necesario introducir la pastilla para dormir, pues de esta forma, aunque la Bella Durmiente sabe que todas las posibilidades se realizan, desconoce lo que ha sucedido en su mundo mientras dormía (Groisman, Hallakoun y Vaidman, 2013; Vaidman, 2021). En la interpretación ortodoxa la pregunta se haría antes de obtener el resultado, ya que la probabilidad es objetiva, mientras que la pregunta a la que realmente está respondiendo la Bella Durmiente es: ¿cuál es la probabilidad de que te encuentres en el mundo en el que ha salido cara?, una pregunta sobre la identidad. Por ello, David Albert (2010), objetó a Vaidman que la probabilidad en la MWI aparece «demasiado tarde».

El postulado de probabilidad en la MWI quedaría entonces enunciado del siguiente modo: «la probabilidad de localización subjetiva en un mundo con un conjunto dado de resultados es el cuadrado absoluto de la amplitud de ese mundo» (McQueen y Vaidman, 2019, p. 15), exactamente el mismo que en las interpretaciones con colapso en las que queremos calcular la probabilidad de que la partícula sea observada en uno u otro estado antes de realizar un experimento. Para dotar de sentido a este postulado de probabilidad, Vaidman introduce una serie de conceptos, todos relacionados entre sí, como son: los descendientes, la medida de existencia de un mundo, la probabilidad de localización subjetiva e ilusión de probabilidad, el principio de comportamiento, o la regla de Born-Vaidman.

3.1.1. La medida de existencia de un mundo y el principio de comportamiento

Como venimos diciendo, no es posible hablar de probabilidad genuina en la MWI, sino que, en este caso, la «medida de existencia de un mundo» es el concepto en torno al cual gira el tipo de probabilidad descrita por Vaidman (2021), pues cada individuo se preocupará de la existencia de sus *descendientes* según la medida de existencia de sus mundos, dada por el resultado del principio de probabilidad que hemos enunciado unas líneas más arriba.

Definimos la medida de existencia de un mundo mediante «el cuadrado de la magnitud del coeficiente de ese mundo en la descomposición del estado del Universo en la suma de estados ortogonales (mundos)» (Vaidman, 1998, p. 254). En palabras más sencillas, «el valor absoluto al cuadrado de la amplitud de un mundo es llamado "medida de existencia"» (Groisman, Hallakoun y Vaidman, 2013, p. 696). La medida de existencia sería, por tanto, el cuadrado del peso de un determinado mundo dentro del estado cuántico del Universo, el cual es la suma de todos los mundos correspondientes a cada posible resultado de la medida, que en el *Sleeping Beauty Problem* (SBP) serían tres. Realizando el cálculo de esta medida de existencia, llegamos igualmente al cuadrado del módulo de la función de onda (Vaidman, 1998):

$$\mu|\alpha|^2/\mu = |\alpha|^2 \qquad (6)$$

Donde μ representa la medida de un mundo que se dividirá en varios mundos, $\mu|\alpha|^2$ es la medida de existencia del mundo en el que el resultado ha sido «cara» y $|\alpha|^2$ es el resultado de dividir, digamos, los casos favorables —en este caso, un mundo donde sale cara— entre los casos posibles —un mundo que se dividirá en tantos mundos como resultados haya—, que es el módulo al cuadrado, la probabilidad de que nuestra Bella se encuentre en dicho mundo; es decir, la probabilidad de localización subjetiva o medida de existencia de un mundo.

Además, la medida de existencia de un mundo «cuantifica la habilidad de un mundo para interferir con otros en un experimento mental» (Vaidman, 2021, párr. 29). Cuanto mayor sea la medida de existencia de un mundo, mayor será su capacidad de interferencia con otros mundos, ya que, puesto que el mundo es entendido como una onda —«Todo es la función de onda universal» (Vaidman, 2012, p. 300)—, del mismo modo que las ondas interfieren entre ellas, los mundos también lo hacen. Solo si un mundo se puede dividir en varias copias podremos encontrar interferencia entre ellas, un mundo que solo tiene un único resultado posible no puede interferir con otros. Tal vez es a esto a lo que Deutsch se refiere cuando, unas páginas atrás, hablábamos de que, aunque normalmente no hay comunicación entre universos, en ocasiones sí encontramos este tipo de interacciones (Davies y Brown, 1989). Algunos ejemplos donde encontramos interferencia entre universos, y que Deutsch expone en *La estructura de la realidad*, son el experimento de la doble rendija y el interferómetro de Mach-Zhender[5], donde las partículas se separan para reunirse de nuevo al término del montaje en uno de los dos detectores. Y a estos dos podríamos añadir el IFM-EV [6] (Elitzur y Vaidman, 1993; Vaidman, 2009).

Ahora bien, que un mundo tenga mayor medida de existencia no significa que «exista más» o que «sea más» que otro; todos existen, son y se perciben del mismo modo (Vaidman, 1998), y su peso tendrá relevancia, por un lado, por su capacidad de interferir con otros mundos, como acabamos de mencionar y, por otro, está ligado al «principio de comportamiento» que explicaremos unas líneas más adelante. Estas son las dos manifestaciones posibles de la medida de existencia, la primera para los mundos presentes —para poder calcular la probabilidad subjetiva— y para los futuros —lo que regulará el «principio de comportamiento» del sujeto. En lo que respecta a esto último, la importancia de la medida de existencia de un mundo en el comportamiento individual se debe a que este principio no se encuentra en la primera parte de la teoría, la referente al formalismo matemático, sino en la segunda, la relativa a nuestra experiencia; todo lo que rodea a la probabilidad pertenece únicamente al ámbito subjetivo, son conceptos de los que el sujeto se sirve para orientar su acción. Por esta razón, algunos físicos consideran que «medida de existencia» (*measure of existence*) es un término filosófico que puede conducir a equívocos puesto que parece tener cierta resonancia ontológica, y abogan por sustituirlo por «medida de cuidado» (*caring measure*) (Vaidman, 2012; Greaves, 2004).

Por otro lado, llamar «medida de cuidado» a la «medida de existencia» no es arbitrario, pues la primera designación guarda mayor relación con el ya mentado principio de comportamiento (*Behavior Principle*), que Vaidman (2021) enuncia así: «nos preocupamos por todos nuestros mundos sucesivos en proporción a sus medidas de existencia» (párr. 45).

> Todos los descendientes tienen la misma información, por lo que otorgarán las mismas asignaciones probabilísticas a los diferentes resultados. Esto permite definir una estrategia de apuesta racional antes del experimento. [...] Por tanto, experiencias idénticas conducen a

[5] Deutsch (1997) explica estas interferencias en términos de «fotones fantasma» que interactúan con «fotones tangibles». Esto no significa que los segundos sean más reales que los primeros, sino que la distinción es únicamente terminológica, para facilitar su comprensión; lo que sucede es que cada fotón es tangible en su universo y fantasma en el resto y, mientras que un fotón tangible atraviesa una rendija, sus contrapartidas de fotones fantasma atraviesan la otra, interfiriendo con él de manera constructiva, cuya manifestación son los puntos iluminados en la pantalla, y destructiva en los que permanecen oscuros.

[6] IFM-EV son las siglas de su nombre en inglés *Interaction Free-Measurement* de Elitzur y Vaidman. En castellano, experimento sin interacción de Elitzur y Vaidman.

> comportamientos idénticos, aunque la argumentación sea diferente en vista de las diferentes visiones del mundo. (Vaidman, 2019, p. 102)

Aunque conceptualmente es importante saber cuándo, en qué medida y cómo podemos o no hablar de «probabilidad», este debate no es tan importante en cuanto a mi comportamiento, pues este será el mismo tanto en la interpretación ortodoxa como en la MWI (Vaidman, 2001, 2012; McQueen y Vaidman, 2019). Un agente racional se comportará siempre «como si» hubiera un significado para la probabilidad, como si fuera real en lugar de una ilusión, en cuyo caso el comportamiento esperado es apostar siempre por el resultado con mayor probabilidad —en el caso concreto de la Bella Durmiente, apostaré por encontrarme en un mundo en el que haya salido o vaya a salir «cruz»—. Por consiguiente, el observador que se encuentra en una rama del Universo en la MWI y el observador en un Universo de un único mundo con colapso estarían, según esto, descritos por el mismo objeto matemático.

Ante la pregunta de si realmente existe la libertad en el determinismo de la MWI, nuestra respuesta será que es precisamente esta condición de ignorancia lo que hace posible el libre albedrío, puesto de manifiesto en el «principio de comportamiento» y la «apuesta inteligente» (Vaidman, 2012) o racional, teniendo en cuenta que serán sus *descendientes* los que ganen o pierdan la recompensa de dicha apuesta. Si en Spinoza la libertad también se explicaba en términos negativos, como ignorancia de las causas y las razones que me determinan, en la MWI esta ignorancia es tal en referencia a la localización subjetiva.

3.1.2. Derivar la regla de Born en la MWI: la regla de Born-Vaidman

Una vez aclarado lo anterior, podemos concluir con la formulación de la regla de probabilidad de Born para la interpretación de los muchos mundos, y es que Vaidman (2019; McQueen y Vaidman, 2019) reconoce que para establecer la conexión entre la ontología descrita por la MWI y nuestra experiencia es necesario añadir alguna asunción que no puede ser derivada únicamente del formalismo de la mecánica cuántica. Este es el caso de la «regla de Born-Vaidman», tal y como la denominó Tappenden (2011).

La regla de Born-Vaidman, es formulada de dos maneras: 1) «la probabilidad de localización subjetiva de un observador en un mundo particular es proporcional a la medida de existencia de ese mundo» (Vaidman, 2019, p. 102), o 2) «un observador debe establecer su probabilidad subjetiva sobre el resultado de un experimento cuántico en proporción a la medida de existencia total de todos los mundos con ese resultado» (Vaidman, 2021, párr. 40). El problema u objeción acerca de cómo sería posible derivar la regla de Born para que coincida numéricamente con el tipo de probabilidad planteada en el marco de la MWI es conocido como «problema cuantitativo» (*quantitative problem*). Sin embargo, gracias a la regla de Born-Vaidman sabemos que es indistinguible el cálculo de probabilidad que realizamos antes de la medida en la interpretación ortodoxa en un único mundo que el llevado a cabo después de la medida en la MWI como señal de ignorancia. La diferencia se encuentra, sobre todo, en que este nuevo postulado está en relación con la segunda parte de la teoría, no con la parte matemática de esta (Vaidman, 2021). Por consiguiente, al mismo tiempo que podría explicar cómo es posible que el sujeto experimente la probabilidad en un experimento cuántico, la MWI resolvería la dificultad que planteaba la imagen de un mundo aleatorio.

> Para mí, un rasgo positivo importante de la MWI es la eliminación de resultados conceptualmente impredecibles desde la teoría fundamental del Universo (Dios *no* juega a los dados). Quiero pensar que, al menos en principio, la Ciencia lo puede explicar todo. (Vaidman, 1998, p. 260)

El debate acerca de la mejor forma de derivar la regla de probabilidad en la MWI sigue todavía abierto (Vaidman, 1998) pues, como veremos a continuación, algunos físicos no se sienten satisfechos con reducir la probabilidad a la ignorancia tras la medida y buscan extraer un postulado de probabilidad anterior a la medida, aunque este siga perteneciendo al ámbito de la subjetividad.

3.2. David Deutsch: el problema cuantitativo y la teoría de la decisión

Podemos resumir la propuesta de Deutsch en las siguientes palabras, que iremos analizando a lo largo de esta sección:

> Un tomador de decisiones que solo cree en la parte no probabilística de la teoría[7], y que es «racional» en el sentido definido por las estrictas restricciones no probabilísticas de la teoría de la decisión clásica, hará que todas sus decisiones dependan de las predicciones de los resultados de las medidas como si esos resultados estuvieran determinados por un proceso estocástico, con probabilidades dadas por la regla de Born. (Deutsch, 1999, p. 3137)

Mientras que Vaidman parece más centrado en poner solución al problema de incoherencia, la aproximación de Deutsch —ampliada por Wallace— se centra en mayor medida en resolver el segundo problema, el cuantitativo (Wallace, 2003). Aunque no entraremos en muchos tecnicismos matemáticos, sí enunciaremos los principios en los que se basa la compleja prueba de Deutsch para aclarar en qué punto nos deja en nuestra búsqueda de una solución para el problema de la probabilidad, así como su posible relación o diferencias respecto a Lev Vaidman. La búsqueda de una solución para este segundo problema lleva a Deutsch (1999) a formular la conocida como «prueba de Deutsch» (*Deutsch's proof*), en la que el físico trata de derivar el postulado de probabilidad a partir del formalismo cuántico y la teoría de la decisión clásica. De hecho, Deutsch (1999) afirma haber hecho en su prueba lo que la filosofía considera una imposibilidad formal, que es derivar el «deber ser» a partir del «ser» —la llamada falacia naturalista—, que en este caso consiste en derivar un postulado de probabilidad a partir de un enunciado de hecho. En dicha prueba se reduce la probabilidad a las preferencias de apuesta de un agente racional.

> Mi método es analizar el comportamiento de un tomador de decisiones racional, quien se enfrenta a decisiones que implican resultados de futuras medidas mecánico-cuánticas. Demostraré que si dicho agente no asume [...] algún postulado probabilístico, pero cree en el resto de la teoría cuántica, necesariamente tomará decisiones como si [el postulado de probabilidad] fuera cierto. (Deutsch, 1999, p. 3129)

A diferencia de la propuesta de Vaidman, en la que la probabilidad se reduce a una probabilidad de tipo ignorancia tras la medida, la aproximación de Deutsch-Wallace, aunque sobre todo la aportación de este último, trata de ofrecer un tipo de probabilidad anterior a la medida (*pre-measurement*). Realmente, ni siquiera resulta indispensable, según Deutsch (1999), hablar de probabilidad para obtener la equivalencia numérica con la interpretación ortodoxa, sino que bastará con encontrar en su lugar unos principios de racionalidad (*rationality principle*s) extraídos a su vez de la teoría de la decisión clásica (*classical decision theory*).

3.2.1. Sobre la Teoría de la Decisión y los agentes racionales

Como dijimos al inicio, para resultar coherente y consistente con las evidencias experimentales, la propuesta de Everett y sus diversas reformulaciones requieren una interpretación de las probabilidades, o al menos algo semejante al cálculo probabilístico (Greaves, 2004; Dawid y Thébault, 2014). Para conseguirlo, y como ya vimos en el apartado anterior con Lev Vaidman, se introduce la incertidumbre, pero podemos encontrar, tal como plantea Greaves (2004), tres líneas generales de respuesta acerca del momento y el modo en que se introduce esta incertidumbre: 1) el argumento de reflexión, una solución que se ubica en el momento posterior a la medida y, apelando al principio de reflexión, si en esa medida no se ha obtenido información relevante, entonces el sujeto, en el instante *t* previo a la medida, habría apostado lo mismo que el sujeto en el instante *t'* posterior a la medida; 2) la segunda es una interpretación basada en la fisión, que niega que la incertidumbre desempeñe un papel esencial en la teoría de la decisión, sustituyendo la incertidumbre por la preocupación que un agente muestra por sus *descendientes* en el momento antes de la medida; 3) por último, la solución que aquí nos interesa, la aplicable a la solución de Deutsch-Wallace, es aquella que postula una incertidumbre subjetiva (*subjective uncertainty*) y anterior a la medida, por lo que un sujeto en una rama de Everett se preguntará en cuál de sus descendientes se va a convertir tras la ramificación (Wallace, 2007, 2013). Según este razonamiento, «nos preguntamos qué estrategias racionales de apuesta están abiertas para un agente que vive en una rama del mundo de Everett; y luego postulamos criterios de racionalidad que se consideran necesarios para un razonamiento coherente» (Dawid y Thébault, 2014,

[7] Con «la parte no probabilística de la teoría» Deutsch se refiere a la interpretación de Everett.

p. 56). Sin embargo, como apunta Greaves (2004), podemos entender estas restricciones o criterios de racionalidad sin necesidad de recurrir a la incertidumbre, pues esta no tiene cabida en la interpretación de Everett; podemos igualmente alcanzar el comportamiento racional en base al hecho de que el sujeto debe preocuparse por todos sus fututos —sus *descendientes*—, por lo que la probabilidad en la prueba de Deutsch se entendería como la medida del grado en que el sujeto actual se preocupa por cada una de sus ramas futuras. Si aceptamos este modo de entender la presente aproximación, lo que acabamos de enunciar sería análogo a la «medida de cuidado» y el «principio de comportamiento» enunciados por Vaidman[8], solo que en este caso el punto de partida es la teoría de la decisión.

En cualquier caso, si asumimos que los resultados de una medida pueden ser interpretados como inciertos —en el sentido de incertidumbre— en la MVT[9], podemos dividir el problema cuantitativo en dos nuevas preguntas (Wallace, 2003, 2013):

1. ¿Está justificado el uso de probabilidades para cuantificar la incertidumbre?
2. ¿Por qué utilizar las probabilidades dadas por la regla de Born y no otras?

La respuesta a la primera pregunta parte de la Teoría de la Decisión clásica, la cual está diseñada para la toma de decisiones en una situación de incertidumbre (Wallace, 2003; Greaves, 2004), y la segunda queda resuelta con la prueba de Deutsch, de la que hablaremos en el siguiente apartado. En cuanto a la Teoría de la Decisión, se trata de una «teoría de acción racional ante la incertidumbre: proporciona un marco en el cual podemos discutir la elección de acciones de un agente, siempre que esas elecciones satisfagan ciertas restricciones intuitivamente razonables que estamos dispuestos a considerar como criterios de racionalidad» (Greaves, 2004, p. 433). Las preferencias del jugador vienen dadas por una función de valor (*value function*) que debe satisfacer dos restricciones asociadas a la teoría de la decisión: la transitividad y la dominancia, y a las que habremos de añadir la fisicalidad, la sustitutividad, la aditividad, la regla de suma cero y la neutralidad de las mediciones (Deutsch, 1999; Wallace, 2003; Greaves, 2004).

Estos postulados se enmarcan en el contexto de un juego cuántico que consta de tres procesos: en primer lugar, se prepara un sistema en un estado determinado $|\boldsymbol{\psi}\rangle$; posteriormente, se mide un observable $\hat{\boldsymbol{X}}$ en dicho estado; por último, en función del resultado del juego, el jugador recibirá una recompensa $\boldsymbol{\mathcal{P}}$ (Wallace, 2003). Una vez explicado en qué consiste un juego cuántico, y para que sus preferencias sean racionales, el sujeto deberá actuar según los dos axiomas de la teoría de la decisión que hemos avanzado anteriormente: la transitividad y la dominancia. En cuanto a la **Transitividad (*Transitivity*)**, las preferencias son transitivas si cuando se prefiere un acto o juego A a un acto o juego B y un acto B a un acto C, se prefiere también un acto A a un acto C (Deutsch, 1999). Por su parte, la **Dominancia (*Dominance*)** implica que si un acto o juego A conduce a consecuencias o recompensas preferibles a las de un acto B en todo estado posible, entonces el acto A tendrá un valor mayor y será preferible al B (Greaves, 2004; Wallace, 2011). Ambos están estrechamente relacionados, pues «las preferencias transitivas pueden sintetizarse asignando un número real —una utilidad o *valor*— a cada posible resultado, de manera que el jugador prefiere resultados con mayor valor antes que aquellos con menor valor» (Deutsch, 1999, p. 3130).

De acuerdo con la **Fisicalidad (*Physicality*)**, el juego[10] descrito es un objeto matemático que representa o instancia un proceso físico, puesto que las preferencias de un agente se refieren siempre a escenarios físicos (Greaves, 2004). Relacionado con esto, y como consecuencia de la incertidumbre subjetiva, encontramos el postulado de la **Neutralidad en las mediciones** (***Measurement neutrality***) (Wallace, 2011; Greaves, 2004), que viene a decir que un agente debe mostrarse indiferente entre dos

---

[8] De hecho, Greaves (2004) también llama «medida de cuidado» («*caring measure*») al principio según el cual «un everettiano racional se preocupa por sus futuros sucesores en proporción a sus medidas relativas de amplitud al cuadrado» (p. 430).

[9] Recordemos que David Deutsch llama «teoría del multiverso» a la interpretación de los muchos mundos; así pues, «universos paralelos» hace referencia a lo que en la MWI eran «muchos mundos» y «multiverso» alude al «Universo» del que hablábamos en apartados anteriores.

[10] Aunque, en pro de la simplificación, aquí nos estamos refiriendo a un único término, «juego», Wallace distingue entre un **juego** (en negrita) y un juego (sin negrita): «La distinción entre **juegos** y juegos puede parecer pedante: toda la estrategia de la física matemática consiste en utilizar objetos matemáticos para representar estados físicos, y fuera de la filosofía de las matemáticas, rara vez, o nunca, es necesario diferenciar entre ambos. [...] la relación de instanciación entre **juegos** y juegos no es uno-a-uno, sino todo lo contrario: muchos **juegos** pueden instanciar un juego dado (no es sorprendente: hay muchas maneras de construir un dispositivo de medición), y (quizá más sorprendente) un solo juego instancia muchos **juegos**» (Wallace, 2003, p. 419).

actos o juegos en los que el sistema $|\psi\rangle$, el observable $\hat{X}$ y la recompensa o consecuencia $\mathcal{P}$ son idénticos, pero se distinguen en la forma en la que el observable ha sido medido en dicho estado[11]. Aunque Deutsch (1999) y Wallace (2003) consideran necesario este postulado para la prueba del argumento del primero, más tarde, Wallace (2011) reconoce que también se puede encontrar la equivalencia entre juegos de una manera más directa: dos juegos pueden considerarse equivalentes si el objeto matemático se refiere al mismo escenario físico. Por poner un ejemplo sencillo, los resultados del lanzamiento de una moneda —esta vez sin la presencia de una Bella Durmiente que ha tomado una pastilla para dormir— son equiprobables, el mundo con resultado «cara» y aquel con resultado «cruz» tienen el mismo coeficiente, y ya sea uno u otro el resultado, el sujeto recibirá la misma recompensa. Dado que lo que le importa al agente es el pago que recibirá en caso de un resultado concreto, se mostrará indiferente (Wallace, 2011) ante la posibilidad de jugar un Juego 1 en el que reciba la recompensa por apostar si el resultado es «cara» y un Juego 2 en el que la recibe si el resultado es «cruz», siempre y cuando, como hemos dicho, el estado, el observable y el pago sean idénticos, según también el «principio de indiferencia» laplaciano.

De todos modos, la neutralidad de las mediciones tendrá un importante papel en la prueba de Deutsch, sobre todo en lo que respecta a ramas con pesos desiguales. La neutralidad de las mediciones se establece sobre la base de la decoherencia, según la cual el número de ramas es desconocido, ya que cualquier cambio en la forma de medir un observable puede modificar el número de ramas resultante tras la medida, y no podremos hablar entonces de cuántos sucesores ven un resultado u otro; es por ello que no debemos confundir esta postura con el «igualitarismo» (Graves, 2004), que parte de una visión idealizada de la ramificación en la que el número de ramas está bien definido por los posibles resultados de una medida.

La **Aditividad** (***Aditivity***) es la conjunción de tres principios: la sustitutividad, la aditividad débil y la regla de suma cero. La **Sustitutividad** (***Substitutivity***) se da en los juegos compuestos (*compound games*), aquellos en los que, dado un juego, se reemplaza alguna —o todas— de sus consecuencias o recompensas por un nuevo juego. De esta forma, «si un agente se muestra indiferente entre obtener una recompensa definitiva c [en un juego] y jugar [de nuevo] algún juego, también debería ser indiferente entre la posibilidad de obtener c y la misma posibilidad de jugar a ese juego» (Wallace, 2003, p. 425). En segundo lugar, en cuanto a la **Aditividad débil** (***Weak aditivity***), imaginemos que un cierto proceso físico instancia un juego ($\mathcal{G}$) en el que se dan los tres procesos mencionados en un inicio —se prepara un sistema en un estado determinado, se mide un observable en dicho estado y se recibe una recompensa—, donde $\mathcal{G} = \langle|\psi\rangle, \hat{X}, \mathcal{P}\rangle$, y tras el juego se entrega al agente una recompensa de valor k. Pues bien, este proceso en el cual se obtiene una recompensa $\mathcal{P}(x_a)$ —tras haber obtenido el resultado x_a— y luego otra recompensa con valor k, es equivalente a obtener una única recompensar con valor $\mathcal{P}(x_a) + k$, siendo $\mathcal{G} = \langle|\psi\rangle, \hat{X}, \mathcal{P} + k\rangle$ el juego que instancia el proceso físico descrito (Wallace, 2003). En otras palabras, «al jugador le es indiferente recibir dos pagos separados con utilidades x_1 y x_2, o recibir un único pago con utilidad $x_1 + x_2$» (Deutsch, 1999, p. 3131). Por último, el tercer componente de la adivitivdad es la **Regla de suma cero** (***Zero-sum rule***), que se da en juegos de suma cero para dos jugadores, es decir, juegos «en los que el único pago consiste en que el dinero cambie de mano entre dos jugadores» (Deutsch, 1999, p. 3131). El póquer es uno de los ejemplos más claros de juegos de suma cero (Poundstone, 2015), donde el que gana se lleva el dinero que los jugadores habían puesto en el centro; es decir, nadie gana nada que el otro no haya perdido, y si el valor que asigna a este juego cada sujeto es $\mathcal{V}_A$ y $\mathcal{V}_B$ respectivamente, entonces $\mathcal{V}_A + \mathcal{V}_B = 0$ (Deutsch, 1999).

3.2.2. El valor de un juego (*the value of a game*) y su utilidad esperada (*Expected Utility*)

Podríamos considerar que lo que Deutsch persigue es hacer corresponder los axiomas de la Teoría de la Decisión con los de la mecánica cuántica, de tal forma que la aditividad débil, por ejemplo, se correspondería con la linealidad de la función de onda, o la regla de suma cero podría corresponderse

[11] Podemos definir la neutralidad de las mediciones en base a la distinción entre **juegos** y juegos de la siguiente manera: «un agente racional es indiferente entre dos juegos físicos siempre que instancien el mismo **juego**» (Wallace, 2003, p. 434). Para un mayor desarrollo de cómo se obtiene esta equivalencia entre juegos mediante la neutralidad en las mediciones, véase Wallace (2011, pp. 12-16).

con el hecho de que la suma de probabilidades debe ser igual a la unidad. Así pues, el físico intenta reformular el formalismo mecánico-cuántico a partir de la Teoría de la Decisión, por lo que transfiere los axiomas expuestos en el punto anterior a la MVT, donde nos encontramos ante una incertidumbre subjetiva, situación en la cual un agente cuantificará esa incertidumbre mediante el uso de términos probabilísticos. Llamamos a esto último Teorema de Representación (*Representation Theorem*) y, según muestra Deutsch (1999), esta asignación de probabilidades se corresponde exactamente con las probabilidades dadas por la regla de Born. Llamaremos a esto «teorema de Deutsch», enunciado de la siguiente manera: «si $\boldsymbol{\mathcal{V}}$ es una función de valor que satisface la Fisicalidad, la Aditividad débil, la Sustitutividad, la Dominancia y la Regla de suma cero, entonces $\boldsymbol{\mathcal{V}}$ viene dada únicamente por la regla de Born[12]» (Wallace, 2003, p. 427). Por consiguiente, el valor esperado $\boldsymbol{\mathcal{V}}$ de un juego cuántico, bajo consideraciones de simetría, es la media de la suma del valor de las consecuencias (c) o recompensas de un juego (Greaves, 2004). Deutsch (1999) define el valor de un juego como «el límite máximo de la cantidad de dinero que un jugador estaría dispuesto a pagar por el privilegio de jugar al juego» (p. 3131). Si se tratara de una superposición de dos componentes con los mismos pesos, la función de valor se representaría como:

$$\boldsymbol{\mathcal{V}}\left[\frac{1}{\sqrt{2}}(|\boldsymbol{x_1}\rangle+|\boldsymbol{x_2}\rangle)\right]=\frac{1}{2}[\boldsymbol{\mathcal{V}}(\boldsymbol{c_1})+\boldsymbol{\mathcal{V}}(\boldsymbol{c_2})] \qquad (7)$$

Deutsch califica esta prueba como fundamental, pues establece la conexión entre amplitudes y probabilidades (Wallace, 2003). Lo mismo sucedería en una superposición de n componentes con la misma amplitud (Deutsch, 1999; Greaves, 2004):

$$\boldsymbol{\mathcal{V}}\left[\frac{1}{\sqrt{n}}(|\boldsymbol{x_1}\rangle+|\boldsymbol{x_2}\rangle+\ldots+|\boldsymbol{x_n}\rangle)\right]=\frac{1}{n}[\boldsymbol{\mathcal{V}}(\boldsymbol{c_1})+\boldsymbol{\mathcal{V}}(\boldsymbol{c_2})+\ldots+\boldsymbol{\mathcal{V}}(\boldsymbol{c_n})] \quad (8)$$

Del mismo modo podremos generalizar esto a una superposición con amplitudes desiguales, en cuyo caso las probabilidades deben ser asignadas de acuerdo con la regla de Born (Deutsch, 1999; Greaves, 2004):

$$\boldsymbol{\mathcal{V}}\left(\sqrt{\frac{m}{n}}|\boldsymbol{x_1}\rangle+\sqrt{\frac{n-m}{n}}|\boldsymbol{x_2}\rangle\right)=\frac{m\boldsymbol{\mathcal{V}}(\boldsymbol{c_1})+(n-m)\boldsymbol{\mathcal{V}}(\boldsymbol{c_2})}{n} \qquad (9)$$

Donde m y n son números enteros. «Es bastante sencillo generalizar este resultado al caso de coeficientes irracionales y superposiciones de un número arbitrario de componentes, demostrando así la regla de Born»[13] (Greaves, 2004, p. 436).

Wallace (2003), por su parte, formula el teorema de Deutsch con una notación distinta:

$$\boldsymbol{\mathcal{V}}\left(|\boldsymbol{\psi}\rangle,\widehat{\boldsymbol{X}},\boldsymbol{\mathcal{P}}\right)=\sum_{\boldsymbol{x}\in\boldsymbol{\sigma}(\boldsymbol{X})}\langle\boldsymbol{\psi}|\widehat{\boldsymbol{P}}_{\boldsymbol{X}}(\boldsymbol{x})|\boldsymbol{\psi}\rangle\,\boldsymbol{\mathcal{P}}(\boldsymbol{x})\equiv\sum_{\boldsymbol{c}\in\boldsymbol{\mathcal{P}}[\boldsymbol{\sigma}(\boldsymbol{X})]}\boldsymbol{c}\boldsymbol{W_{\mathcal{G}}}(\boldsymbol{c}) \qquad (10)$$

Donde $\boldsymbol{x}\in\boldsymbol{\sigma}(\boldsymbol{X})$ es cualquier valor propio del espectro $\widehat{\boldsymbol{X}}$; $\widehat{\boldsymbol{P}}_{\boldsymbol{X}}(\boldsymbol{x})$ es el proyector sobre el subespacio propio de $\widehat{\boldsymbol{X}}$ con el valor propio $\boldsymbol{x}$; $\boldsymbol{\mathcal{P}}(\boldsymbol{x})$ representa el pago recibido dado $\boldsymbol{x}$; $\boldsymbol{c}\in\boldsymbol{\mathcal{P}}[\boldsymbol{\sigma}(\boldsymbol{X})]$ sería un pago c perteneciente a los posibles pagos del espectro de $\widehat{\boldsymbol{X}}$; y $\boldsymbol{c}\boldsymbol{W_{\mathcal{G}}}(\boldsymbol{c})$ es el peso de la recompensa, es decir, la suma de los pesos de todas las ramas donde se obtiene una recompensa $\boldsymbol{c}$. «El peso de una rama es simplemente el módulo al cuadrado de la amplitud de una rama (en relación con la amplitud anterior a la ramificación, por supuesto)» (Wallace, 2003, p. 421).

Los dos últimos pasos de la prueba de Deutsch según la notación de Wallace (2003) nos llevan a concluir, por medio de la Dominancia, Sustitutividad, Aditividad, Fisicalidad y la Regla de suma cero, que

$$\boldsymbol{\mathcal{V}}(|\boldsymbol{\psi}\rangle)=|\boldsymbol{\alpha_1}|^2\boldsymbol{x_1}+|\boldsymbol{\alpha_2}|^2\boldsymbol{x_2} \qquad (11)$$

y, para un caso de medición de n términos[14],

$$\boldsymbol{\mathcal{V}}(|\boldsymbol{\psi}\rangle)=\textstyle\sum_{\boldsymbol{i}}|\boldsymbol{\alpha_i}|^2\boldsymbol{x_i} \qquad (12)$$

[12] Véase Deutsch (1999) y Wallace (2003) para la demostración matemática del cumplimiento de estas reglas.
[13] Para conocer en profundidad y con mayor rigurosidad esta prueba, véase Wallace (2003, pp. 428-430).
[14] Las mediciones de n términos se arman, mediante sustitutividad, con mediciones sucesivas de dos términos (Wallace, 2003).

Así pues, «en la toma de decisiones sobre los resultados de las medidas, un tomador de decisiones racional se comporta como si creyera que cada posible resultado $\boldsymbol{x_a}$ tuviera una probabilidad, dada por la fórmula convencional $|\langle \boldsymbol{x_a} | \boldsymbol{\psi} \rangle|^2$, y como si estuviera maximizando el valor de la expectativa probabilística del pago» (Deutsch, 1999, p. 3132).

Más tarde, Wallace (2003) introduce una serie de cambios en el teorema e incluye la llamada «regla de la utilidad esperada» («*expected utility rule*»):

> Si $\boldsymbol{\mathcal{V}}$ es cualquier función de valor que satisface la fisicalidad, la dominancia y la aditividad, vendrá dada por la regla de Born. La prueba procede a través de la parte 3 del Teorema de Equivalencia (Equivalencia General)[15], el cual Deutsch no usa en su propia prueba. Definimos la *utilidad esperada* de un juego[16] mediante $\boldsymbol{EU}(\boldsymbol{\mathcal{G}}) = \sum_{\boldsymbol{C}} \boldsymbol{W}_{\boldsymbol{\mathcal{G}}}(\boldsymbol{c})\, \boldsymbol{c}$, donde la suma abarca los distintos pagos realizados. (p. 430)

En conclusión, siguiendo la aproximación de Deutsch-Wallace, «la aplicación de la regla de Born a las amplitudes proporcionadas por la mecánica cuántica constituye la única estrategia de apuesta racional si se está convencido de que la mecánica cuántica everettiana es verdadera» (Dawid y Thébault, 2014, p. 56). Desde este punto de vista, el problema de incoherencia solo es un problema si tomamos como criterio indispensable para la aplicación del término «probabilidad» el hecho de que tras la medición solo tenga lugar uno de los posibles resultados, entendiendo así que la probabilidad mide un tipo de incertidumbre no subjetiva, sino relacionada con el estado real, objetivo, del mundo. No obstante, si consideramos que el rasgo principal de la probabilidad es su capacidad de prescribir una acción racional, el problema de incoherencia deja de ser un problema y se convertiría en la necesidad de encontrar un principio de racionalidad, con o sin la denominación de «probabilidad» (Greaves, 2004).

Críticos como Dawid y Thébault (2014) califican estas soluciones de «subjetivistas», además de ajenas a las formas de razonamiento científico, pues los pesos de las distintas ramas solo adquieren significado con respecto a un sujeto individual situado en una rama particular, pero no nos dice nada acerca de si un evento ocurrirá o no. No obstante, Vaidman, Deutsch y Wallace no son, desde luego, los primeros en abrir la puerta a un tipo de probabilidad subjetiva, sino que de Finetti (1931) ya afirmó que la probabilidad subjetiva opera sobre el grado psicológico de confianza de un individuo respecto a una cierta suposición desde una situación de incertidumbre, y

> Es justo ese grado completamente subjetivo de confianza lo que en el lenguaje corriente se designa con el nombre de probabilidad [...] el lenguaje ordinario tiene, por esta vez, un valor absolutamente superior al de los matemáticos que desde hace siglos se afanan inútilmente en ver aquí un significado que no existe. (de Finetti, 1931, p. 174)

Esta analogía con la probabilidad subjetiva de Finetti debe ser entendida en su justa medida, teniendo presente que, en el caso de Deutsch y Wallace, la teoría de la decisión es trasladada a la interpretación de Everett de la mecánica cuántica, donde la probabilidad no guarda relación con algo que ocurrirá probablemente, sino con algo que de hecho va a ocurrir. Además, otra de las principales diferencias con aproximaciones como la de de Finetti es que Deutsch «utiliza la noción operacionalista de probabilidad no solo para dar sentido al discurso probabilístico dentro de la interpretación de Everett, sino también para demostrar que los agentes deben utilizar la función de los pesos para determinar las probabilidades» (Wallace, 2011, p. 7). Esto no tiene nada de arbitrario, como parecen sugerir Dawid y Thélbaut (2014) en su crítica a la aproximación de Deutsch-Wallace, sino que está sujeta a ciertas leyes, y todos los individuos que se ajusten a ella estarán juzgando correctamente, serán considerados individuos «coherentes» (de Finetti, 1931).

[15] El Teorema de equivalencia (*Equivalence Theorem*) muestra cuándo dos juegos son equivalentes, y podemos encontrar tres tipos de equivalencia: equivalencia de los pagos (*Payoff Equivalence*), equivalencia de las medidas (*Measurement Equivalence*) o equivalencia general (*General Equivalence*). Mientras Deutsch utiliza para su prueba las dos primeras, Wallace se vale de la tercera, según la cual un juego $\mathcal{G}$ es equivalente a un juego $\mathcal{G}'$ si y solo si el peso del primero $W_{\mathcal{G}}$ es igual al peso del segundo $W_{\mathcal{G}'}$ (Wallace, 2003).

[16] Wallace (2003) utiliza en esta ocasión **juego** en negrita.

Hemos de precisar que, como ya mencionamos anteriormente, Deutsch concluye que ni siquiera es necesario hablar de probabilidad, sino que basta con que el sujeto tenga un comportamiento racional —conseguido a partir de los axiomas de la teoría de la decisión y el resto de postulados explicados en el punto 3.2.1.— y que cuantifique su incertidumbre en forma de probabilidad —en concreto, en base a la regla de probabilidad de Born—. Del mismo modo, Vaidman nos habla de «probabilidad de locaclización subjetiva» cuando esta se da tras la medida, mientras que la probabilidad anterior a la medida será una «ilusión de probabilidad».

4. Conclusiones

Hemos ubicado aquí la probabilidad en la interpretación de los muchos mundos o multiverso a medio camino entre el formalismo de la teoría cuántica y nuestra experiencia. Por la ontología presentada por la formulación del estado relativo sabemos que todos los resultados posibles de una medida tendrán lugar, por lo que la probabilidad no puede ser la medida de la certidumbre de que un evento vaya a ocurrir, sino que entrará en juego como reguladora del comportamiento del agente en base al conocimiento que el sujeto posee acerca del estado objetivo del Universo. Los defensores de la MWI o la MVT han tratado de derivar la regla de probabilidad de Born y, a su vez, esclarecer el significado que esta pueda tener en dicha interpretación, de manera que sea compatible con nuestra experiencia ordinaria. Por tanto, la probabilidad, tanto en el caso de Vaidman como en la aproximación de Deutsch-Wallace, hace su aparición como un postulado de probabilidad subjetiva, un postulado epistemológico, relevante únicamente para el sujeto que busca orientar su acción —su apuesta en un juego—, pero no como postulado ontológico, es decir, no es algo que la Naturaleza desconozca (Vaidman, 2019), algo aleatorio, sino que es, en terminología de Wallace (2003, 2005, 2011), una «incertidumbre subjetiva».

Puesto que la probabilidad en la MWI no es arbitraria, sino que posee una fundamentación matemática según vimos en la prueba de Deutsch, decíamos que las estimaciones y apuestas de todos los individuos en una situación —o juego— determinada deben ser idénticas y se comportarán en base a esos «axiomas intuitivamente razonables» si quieren considerarse sujetos —jugadores— racionales. En el caso de Vaidman hablamos igualmente de sujetos racionales como aquellos que obran según el enunciado «principio de comportamiento». A su vez, continuando con la analogía con de Finetti (1931) del apartado anterior, este defiende también que «el cálculo de probabilidades no es otra cosa que la teoría matemática que enseña a ser coherentes» (p. 178); si este es el objetivo de la probabilidad, entonces habría que darles la razón a Vaidman, Deutsch y Wallace y concluir que el problema de incoherencia deja de ser un problema en tanto que podemos alcanzar esta coherencia, que nuestros físicos llaman «racionalidad», en la MWI o MVT, con independencia de que prefiramos, por diferenciarla de la probabilidad en el sentido ordinario, sustituir el término «probabilidad» por la «medida de existencia de un mundo», la «medida de cuidado», el «principio de comportamiento», la «función de valor de un juego» o su «utilidad esperada».

En este trabajo hemos tratado de ofrecer un acercamiento terminológico a dos propuestas de solución al problema de incoherencia y el cuantitativo de la formulación del estado relativo de Everett y sus versiones posteriores. Hemos visto que, mientras que Vaidman defiende que la decoherencia no es necesaria y no juega ningún papel en la MWI, Wallace (2007, 2013) parte de la idea de que la ramificación se produce precisamente debido a la decoherencia. La incertidumbre subjetiva de Deutsch-Wallace es análoga a la ilusión de probabilidad de la que hacía mención Vaidman, solo que mientras Vaidman da una clara mayor importancia a esta probabilidad en el momento posterior de la medida —de ahí su probabilidad de localización subjetiva—, Deutsch y Wallace se centran por completo en el momento anterior a la ramificación.

Aunque aquí hemos considerado el problema cuantitativo casi como una consecuencia del problema de incoherencia, Wallace plantea la posibilidad de que Deutsch resuelva el problema cuantitativo pero no el de incoherencia, pues dado que el Teorema de Representación (*Representation Theorem*) —según el cual, recordemos, se deduce que un agente racional que se enfrenta a la incertidumbre cuantificará esa incertidumbre por medio de la probabilidad— puede demostrarse sin necesidad de hacer referencia a la teoría cuántica,

> Deutsch no puede afirmar que ha derivado el concepto mismo de *probabilidad* (por supuesto, el teorema de la representación no menciona la regla de Born, por lo que Deutsch todavía *puede*

> afirmar que ha derivado la regla específica de probabilidad en cuestión) [...] Deutsch tampoco puede afirmar que haya deducido la existencia de *incertidumbre* a partir de su punto de partida, ya que los supuestos que plantea sobre la teoría de la decisión solo se aplican a una situación en la que la incertidumbre ya está presente [...] (esto equivale a decir que el trabajo de Deutsch resuelve probablemente el problema cuantitativo pero no el de incoherencia). (Wallace, 2003, p. 432)

De cualquier modo, como parece que la finalidad de ambas propuestas es la búsqueda de una acción racional, tal vez podríamos decir que el «valor de un juego» de la prueba de Deutsch tiene la misma función que la «medida de existencia de un mundo» en la de Vaidman, y los «principio de racionalidad» del primero serían el «principio de comportamiento» del segundo, que a su vez viene dado por la «medida de cuidado», solo que, como la prueba de Deutsch parece más centrada en el problema cuantitativo —la parte más matemática del problema, podríamos decir— estos conceptos aparecen muchos más desarrollados y adquieren una mayor importancia que en la aproximación de Vaidman. En este sentido, Lev Vaidman nos proporciona una conceptualización clara e introductoria para entender la interpretación, y un acercamiento y posible solución al problema de incoherencia, así como una regla —la de Born-Vaidman— para derivar el segundo problema, pero los detalles que conciernen a la parte más exacta y matemática del asunto los encontramos en la prueba de Deutsch y el desarrollo que David Wallace hace de esta.

Ninguna de estas soluciones está exenta de críticas y, debido a la complejidad del asunto y los muchos otros problemas que acompañan al de la probabilidad, como pueden ser el problema de la base preferida o el de identidad, no hay todavía una respuesta unánime por parte de los defensores de esta interpretación. Como consecuencia de ello, han surgido nuevas interpretaciones como la de las muchas mentes, las historias consistentes o la interpretación relacional. Seguimos sin disponer de un criterio de demarcación que nos permita saber cuándo una interpretación es preferible a su rival, por lo que de momento las interpretaciones serían meras posibilidades de explicación. Tal vez, desde varios puntos de vista, la de los muchos mundos sea una de las mejores explicaciones de las que disponemos por el momento, como así lo muestra el considerable esfuerzo que se ha venido realizando durante estos últimos años por parte de un grupo de físicos y filósofos de la física para dar solución a los problemas de la MWI, esfuerzo que podría dar como resultado un futuro consenso que aporte legitimidad a la teoría, además de cierta ventaja frente al resto de interpretaciones de la mecánica cuántica.

Referencias

Albert, D. (2010). Probability in the Everett Picture. En S. Saunders et al. (Eds), *Many Worlds? Everett, Quantum Theory, and Reality* (pp. 355-368). Oxford Academic. https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199560561.003.0013

Arana, J. (2002). El panteísmo de Erwin Schrödinger. *Diálogos, 37*(79), 11-34. https://revistas.upr.edu/index.php/dialogos/article/view/19643

Arana, J. (2012). El problema de la causalidad en la mecánica cuántica. *Eikasia: revista de filosofía*, *43*, 17-34.

Barrett, J. (2018). "Everett's Relative-State Formulation of Quantum Mechanics, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Winter 2018 Edition), Edward N. Zalta (Ed.). https://plato.stanford.edu/archives/win2018/entries/qm-everett/

Bernoulli, J. (1713). *Ars conjectandi*. En *Die Werke von Jakob Bernoulli*, Basel Naturforschende Gesellschaft, 1975. Traducción al inglés: Sung, B. (1996). *Translations from James Bernoulli*. Harvard University, Tecnical Report nº 2. Traducción al castellano: Rivadulla, A. (1993). *Teoría de probabilidades*. Universidad Complutense de Madrid. https://cutt.ly/78fru2R

Bohr, N. (1988). *La teoría atómica y la descripción de la Naturaleza* (M. Ferrero, Trad.). Alianza Editorial.

Cassinello, A. (1994). La interpretación de los muchos universos de la mecánica cuántica. Apuntes históricos. *Arbor CXLVIII*, *584*, 47-68.

Cassinello, A., Sánchez Gómez, J. L. (2012). *La realidad cuántica*. Crítica.

Davies, P., Brown, J. (1989). *El espíritu en el átomo*. Alianza Editorial.

Dawid, R., & Thébault, K. P. Y. (2014). Against the Empirical Viability of the Deutsch-Wallace-Everett Approach to Quantum Mechanics. *Studies In History and Philosophy of Science Part B: Studies In History and Philosophy of Modern Physics*, *47*(1), 55-61. https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2014.05.005

De Finetti, B. (1931). Sul significato soggetivo della probabilità. *Fundamenta Mathematicae*, 17, 298-329. En la traducción de B. Torretti (2020), Sobre el significado subjetivo de la probabilidad. *Revista de Filosofía*, 58, 171-198. https://cutt.ly/18frlKA

Deutsch, D. (1985). Quantum Theory as a Universal Physical Theory. *International Journal of Theoretical Physics, 24*(1), 1-41. https://doi.org/10.1007/BF00670071

Deutsch, D. (1997). *The Fabric of Reality*. Penguin Books.

Deutsch, D. (1999). Quantum Theory of Probability and Decisions. *Proceedings of the Royal Society. Mathematical, Physical & Engineering Sciences, 455*(1988), 3129-3137. https://doi.org/10.1098/rspa.1999.0443

DeWitt, B. S. (1970). Quantum mechanics and reality. Could the solution to the dilemma of indeterminism be a universe in which all possible outcomes of an experiment actually occur? *Physics Today*, *23*(9), 155-165.

DeWitt, B. S. y Graham, N. (Eds.). (1973). *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics.* Princeton University Press.

Elitzur, A. C. y Vaidman, L. (1993). Quantum Mechanical Interaction-Free Measurements. *Found Phys 23*, 987–997. https://doi.org/10.1007/BF00736012

Everet, III, H. (1957). "Relative State" Formulation of Quantum Mechanics. *Reviews of Modern Physics, 29*(3), 454-462. https://doi.org/10.1103/RevModPhys.29.454

Gherab Martín, K. J. (2020). Biología y filosofía de la complementariedad en Niels Bohr. *Bajo Palabra*, *24*, 449–474. https://doi.org/10.15366/bp.2020.24.023

Gómez Pin, V. (2019). *Tras la física. Arranque jónico y renacer cuántico de la filosofía*. Abada Editores.

Greaves, H. (2004). Understanding Deutsch's Probability in a Deterministic Multiverse. *Studies In History and Philosophy of Science Part B: Studies In History and Philosophy of Modern Physics 35*(3), 423-456. https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2004.04.006

Groisman, B., Hallakoun, N. y Vaidman, L. (2013). The measure of existence of a quantum world and the Sleeping Beauty Problem. *Analysis, 73*(4), 695-706. https://doi.org/10.1093/analys/ant072

Lewis, P. J. (2007). Uncertainty and Probability for Branching Selves. *Studies in History and Philosophy of Science Part B, 38*(1), 1-14. https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2006.02.001

Lockwood, M. (1996). "Many Minds" Interpretations of Quantum Mechanics. *The British Journal for the Philosophy of Science, 47*(2), 159-188.
McQueen, K. J. y Vaidman, L. (2019). In defence of the self-location uncertainty account of probability in the many-worlds interpretation. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, *66*, 14-23. https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2018.10.003
McQueen, K. J. y Vaidman, L. (2020). How the Many Worlds Interpretation Brings Common Sense to Paradoxical Quantum Experiments. En R. Peels, J. de Ridder & R. van Woudenberg (Eds.), *Scientific Challenges to Common Sense Philosophy* (Chapter 3). Routledge. DOI:10.4324/9781351064224-3
Penrose, R. (1991). *La nueva mente del emperador* (J. García, Trad.). Penguin Random House.
Pérez Marcos, M. (2020). El universo inquieto de Max Born. En J. Arana. (Dir.), *La cosmovisión de los grandes científicos del siglo XX* (pp. 136-148). Tecnos.
Poundstone, W. (2015). *El dilema del prisionero* (D. Manzanares, Trad.). Alianza Editorial.
Ramsey, F. (1926). "Truth and Probability". En *The Foundations of Mathematics and Other Logical Essays*, R.B. Braithwaite (Ed.). Kegan Paul, Trench, Trubner, & Co., 1931.
Rovelli, C. (2022). *Helgoland* (P. González, Trad.). Anagrama.
Sánchez Cañizares, J. (2020). Werner Heisenberg: entre incertidumbre e indeterminación. En J. Arana (Dir.), *La cosmovisión de los grandes científicos del siglo XX* (pp. 149-159). Tecnos.
Sánchez Gómez, J. L. (2000). Interpretación actual de la teoría cuántica: de los muchos universos a las historias consistentes. *Arbor CLXVII*, 659-660, 475-488.
Schrödinger, E. (2001). *La nueva mecánica ondulatoria y otros escritos* (J. Arana, Ed.). Editorial Biblioteca Nueva.
Selleri, F. (1986). *El debate de la teoría cuántica* (M. Ferrero, Trad.). Alianza Editorial.
Tappendent, P. (2011). Evidence and Uncertainty in Everett's Multiverse. *British Journal for the Philosophy of Science, 62*(1), 99-123.
Vaidman, L. (2000). Discussion: Byrne and Hall on Everett and Chalmers. *arXiv: Quantum Physics.* https://doi.org/10.48550/arXiv.quant-ph/0001057
Vaidman, L. (1998). On schizophrenic experiences of the neutron or why we should believe in the many-worlds interpretation of quantum theory. *International Studies in the Philosophy of Science, 12*(3), 245-261. https://doi.org/10.1080/02698599808573600
Vaidman, L. (2001). Probability and the Many-Worlds Interpretation of Quantum Theory. *ArXiv: Quantum Physics*. https://doi.org/10.48550/arXiv.quant-ph/0111072
Vaidman L. (2009) Interaction-Free Measurements (Elitzur—Vaidman, EV IFM). In D. Greenberger, K. Hentschel y F. Weinert (Eds.), *Compendium of Quantum Physics* (pp. 317-322). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-70626-7_98
Vaidman, L. (2012) Probability in the Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics. In Y. Ben-Menahem y M. Hemmo (Eds.), *Probability in Physics. The Frontiers Collection* (pp. 299-311). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-21329-8_18
Vaidman, L. (2019). Ontology of the wave function and the many-worlds interpretation. En O. Lombardi, S. Fortin, C. López, & F. Holik (Eds.), *Quantum Worlds: Perspectives on the Ontology of Quantum Mechanics* (pp. 93-106). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781108562218.007
Vaidman, L. (2021). "Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics". *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Fall 2021 Edition), Edward N. Zalta (Ed.). https://cutt.ly/z8frJYP
Wallace, D. (2003). Everettian Rationality: Defending Deutsch's Approach to Probability in the Everett Interpretation. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics, 34*(3), 415-439. DOI: https://bit.ly/3Ixo3BS
Wallace, D. (2007). Quantum Probability from Subjective Likelihood: Improving on Deutsch's Proof of the Probability Rule. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics, 38*(2), 311-332. https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2006.04.008
Wallace, D. (2011). The Everett Interpretation. [Preprint]. *PhilSci Archive*, 1-25. https://bit.ly/3EGSMew

Wallace, D. (2013). The Evertt Interpretation. En R. Batterman (Ed.), *The Oxford Handbook of Philosophy of Physics*. (pp. 460-488). Oxford Handbooks. DOI: https://bit.ly/3IwRKCR