



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN FILOSOFÍA DE LA CIENCIA

**HACIA UN HUMEANISMO CUÁNTICO:
UNA PROPUESTA DE RECONCILIACIÓN ENTRE
SUPERVENIENCIA HUMEANA Y MECÁNICA CUÁNTICA**

T E S I S

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
DOCTORA EN FILOSOFÍA DE LA CIENCIA**

PRESENTA

TATIANA SALAZAR JIMÉNEZ

TUTORES PRINCIPALES

DR. SERGIO FERNANDO MARTÍNEZ MUÑOZ (IIFs-UNAM)

DR. ELÍAS OKÓN GURVICH (IIFs-UNAM)

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR

DR. JOSÉ ÉDGAR GONZÁLEZ VARELA (IIFs-UNAM)

DR. ALESSANDRO TORZA (IIFs-UNAM)



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis fue realizada gracias al apoyo económico del CONACYT, beca para estudios de doctorado otorgada durante el periodo 2013-2017; y del proyecto PAPIIT: Explorando la gravitación con la cuántica y viceversa (clave: IG100316), beca para la obtención de grado de doctorado, febrero-julio de 2017.

Quiero agradecer el apoyo personal y las contribuciones intelectuales durante la elaboración de este trabajo a:

Mis tutores principales:

Dr. Sergio Fernando Martínez Muñoz y Dr. Elías Okón Gurvich, IIFs-UNAM

Los miembros de mi comité tutor:

Dr. José Édgar González Varela, IIFs-UNAM

Dr. Alessandro Torza, IIFs-UNAM

Mi sinodal:

Dr. Aldo Filomeno Farrerons, Instituto de Filosofía - Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile

Mis colegas:

Dr. David Fajardo Chica

Dr. Miguel Ángel Sebastián González

TABLA DE CONTENIDO

Introducción	1
1. Sobre la naturalización de la metafísica	3
2. El compromiso naturalista	7
3. El proyecto metafísico de David Lewis	13
4. Esquema de la investigación.....	20
Capítulo I Leyes de la naturaleza.....	25
1. ¿Qué son las leyes de la naturaleza?	25
2. La concepción necesitarista	30
2.1. Universalismo acerca de leyes	32
2.2. Primitivismo acerca de leyes	35
2.3. Reduccionismo acerca de leyes.....	43
3. La concepción regularista	47
3.1. La tesis de superveniencia humeana	48
3.2. Consideraciones filosóficas en contra de la superveniencia humeana	51
3.3. Consideraciones científicas en contra de la superveniencia humeana	55
4. Sumario.....	62
Capítulo II Fundamentos de la mecánica cuántica.....	65
1. Mecánica cuántica: conceptos básicos	66
1.1. Estados cuánticos representados como vectores en espacios de Hilbert	67

1.2. Estados cuánticos representados por medio de funciones de onda	78
2. El problema de la medición.....	84
3. Interpretaciones de la mecánica cuántica	90
3.1. Mecánica bohmiana.....	90
3.2. Colapso objetivo: GRW.....	94
3.3. Muchos mundos	100
4. Sumario.....	103
Capítulo III Metafísica de la función de onda.....	107
1. Realismo de la función de onda	108
2. Críticas y alternativas al realismo de la función de onda como campo en el espacio de configuración	113
2.1. La función de onda como ley de la naturaleza	115
2.2. La función de onda como una propiedad de los sistemas cuánticos	123
2.3. La función de onda como un nuevo tipo de categoría ontológica	128
3. Sumario.....	134
Capítulo IV Hacia un humanismo cuántico.....	137
1. Dimensiones de aproximación al problema del realismo de la función de onda	137
1.1. Interpretación de la mecánica cuántica	138
1.2. Espacio físico fundamental.....	140
1.3. Prioridad ontológica	142
2. Categorización de posibles soluciones al problema del realismo de la función de onda	143

3. La tesis de superveniencia humeana frente al realismo de la función de onda	146
3.1.Reinterpretación de la superveniencia humeana: realismo del espacio de configuración	148
3.2.Reinterpretación de la superveniencia humeana: realismo del espacio tridimensional	154
3.3.Reinterpretación de la superveniencia humeana: la función de onda como metafísicamente primitiva en 3D	164
4. Sumario.....	175
Conclusiones.....	179
Bibliografía	183

INTRODUCCIÓN

La *mecánica cuántica* es una de las teorías más exitosas en la historia de la ciencia. Su impresionante poder predictivo y explicativo para múltiples fenómenos a nivel subatómico y su amplia variedad de aplicaciones tecnológicas han modificado profundamente la manera en la que concebimos y nos relacionamos con el mundo. Aunque como teoría científica no está libre de problemas, la mecánica cuántica es, definitivamente, uno de los pilares de la ciencia contemporánea y una guía ineludible en la búsqueda del conocimiento de la naturaleza última del mundo.

Por su parte, el *realismo modal*¹ de David Lewis es una de las tesis metafísicas más prometedoras de la filosofía contemporánea. Lewis defiende que aceptar literalmente el discurso de mundos posibles —esto es, aceptar que todo mundo posible es real— es la vía para construir una teoría que nos permita explicar una gran variedad de problemas filosóficos aparentemente disímiles, entre los que se encuentran, por mencionar algunos: la metafísica modal; las nociones de causalidad, leyes de la naturaleza y contrafácticos; y la teoría del significado lingüístico. La propuesta de Lewis no sólo tiene la ventaja de ser unificadora, sino que simplifica la metafísica al eliminar una cantidad de nociones primitivas históricamente problemáticas, como las de necesidad, posibilidad, contingencia, esencia, entre otras. Para lograrlo, Lewis propone —como veremos— una base metafísica simple de la cual deriva todo lo demás.

La propuesta metafísica de Lewis se inscribe dentro de la tradición filosófica naturalista, esto es, dicho brevemente, una tradición que asume que la filosofía no debe desarrollarse de manera aislada de la ciencia, sino en cierta

¹ Presentado y defendido principalmente en el libro *On the Plurality of Worlds* (Lewis, 1986a).

continuidad con ella. Uno de los postulados fundamentales del realismo modal es lo que se conoce como la tesis de *superveniencia humeana* (Lewis, 1986b). A través de dicha tesis, Lewis fija lo que será la base metafísica de los mundos posibles, es decir, define lo que se tomará como metafísicamente primitivo dentro de la propuesta y la manera en la que surge, a partir de ello, todo lo demás.² El problema es, como han señalado sus críticos, que la mecánica cuántica parece estar en contra de la tesis de superveniencia humeana. Así pues, si tomamos en serio los resultados de la ciencia, como dicta el principio naturalista, la tesis de superveniencia humeana y, por lo tanto, el realismo modal deberían quedar descartados.

El trabajo que aquí presento es una investigación metafísica de corte naturalista. El objetivo principal es proponer una solución al reto que la teoría de la mecánica cuántica le impone a la tesis de *superveniencia humeana*. En el camino para conseguirlo se hace ineludible la necesidad de adoptar una postura frente a la naturaleza metafísica de la *función de onda* —uno de los elementos centrales de la teoría de la mecánica cuántica—. La discusión acerca de la naturaleza metafísica de la función de onda es una de las preocupaciones principales dentro de la agenda de la filosofía de la física desde hace algunos años. Actualmente, ninguna de las propuestas acerca de *qué tipo de cosa es* —o no es— la función de onda parece imponerse de manera contundente sobre las demás. Teniendo esto en cuenta, mi propuesta resulta ser, entonces, no sólo una manera de solucionar el problema que enfrenta la tesis de superveniencia humeana, sino también una defensa de una concepción metafísica particular con respecto a la función de onda, a saber: que la función de onda es real y es una propiedad no-local.

Para poner en marcha el desarrollo de mi proyecto, resulta pertinente sentar de antemano las bases metodológicas sobre las cuales trabajo, esto es,

² La postulación específica de la tesis de *superveniencia humeana* se presentará con detalle más adelante; basta por el momento con identificar el papel que cumple dentro de la teoría de Lewis.

especificar los compromisos naturalistas por los que se guía mi investigación. A continuación presento, entonces, las motivaciones y compromisos específicos que asumo en ese sentido.

1. Sobre la naturalización de la metafísica

La metafísica intenta dar respuesta a preguntas fundamentales acerca de la realidad como: ¿cuáles son sus componentes?, ¿cuál es su naturaleza?, ¿cómo se comportan?, ¿qué tipos de relaciones establecen?... En otras palabras, la metafísica intenta determinar *qué es lo que hay y cómo es aquello que hay*. Igualmente, se pretende que, resolviendo cuestiones como las anteriores, la metafísica pueda darnos las bases para delimitar ciertos conceptos de difícil aprehensión como lo son los de causación, regularidad, identidad, posibilidad, necesidad, etc.

En los albores de la empresa del conocimiento humano, los estudios del tipo que hoy conocemos como *ciencias naturales* estaban incluidos dentro de la metafísica como una *filosofía natural*. Con el surgimiento de las ciencias metódicas y experimentales durante el Renacimiento, estos tipos de estudio fueron tomando rumbos distintos —por no decir que opuestos—, hasta que la metafísica resultó convirtiéndose, a los ojos de muchos, en una disciplina “misteriosa” que poco o nada tenía para decir acerca de la naturaleza y la realidad.

La principal razón para esta actitud de rechazo hacia la metafísica —como fuente de conocimiento de lo real— ha tenido que ver con la supuesta naturaleza de los métodos que utilizan los filósofos para plantear sus tesis. Generalmente, los métodos de la metafísica han sido asociados con la teorización y estipulación *a priori*, la intuición y el análisis conceptual. Estas vías, según sus críticos, poco o nada tienen que ver con una aproximación directa al objeto de estudio, lo que termina por deslegitimar las afirmaciones que hace la metafísica acerca de la realidad. En la siguiente sección volveré a la cuestión sobre las similitudes y

diferencias entre el método filosófico y el método científico, por el momento me interesa señalar que, a pesar de la aparente división entre ellas, la pregunta fundamental —la pregunta *acerca de lo que hay*— sigue estando en la base tanto de la investigación metafísica, como de la investigación científica. Más allá de la postura particular de algunos filósofos y científicos³, la ciencia puede ser entendida como una empresa que permite dar cuenta de *qué es lo que hay y cómo es aquello que hay*.

Si se adopta una postura realista simple con respecto a la ciencia⁴, puede decirse que cuando se acepta una teoría científica, se aceptan con ella entidades y procesos que explican o dan lugar a los fenómenos a los que tenemos acceso a través de la observación. Las teorías científicas postulan clases de objetos que deben poseer determinadas propiedades para ser considerados como tales; además, sugieren mecanismos que operan a través de dichos objetos y relaciones que se establecen entre ellos. Todo esto se logra a través de un método que nos asegura, por lo menos, una adecuación empírica, es decir, una coincidencia entre las predicciones derivadas de las teorías y las observaciones realizadas directamente en el mundo. Así pues, una teoría científica bien construida puede entenderse como un punto de partida para llegar a establecer *qué es lo que hay*

³ Aunque para muchos podría parecer evidente que el objetivo último de la ciencia es llegar a conocer la realidad más allá de los fenómenos; cuando se analiza la historia de la ciencia y los argumentos que defienden algunos filósofos en contra de esto, no queda claro que, de hecho, ése sea necesariamente el objetivo de la ciencia. El *instrumentalismo científico*, por ejemplo, considera que la ciencia plantea teorías que simplemente están de acuerdo con las observaciones, que permiten hacer buenas predicciones e, incluso, manipular los fenómenos con fines específicos, pero que no hay buenas razones para pensar que sus postulados teóricos correspondan con una realidad más allá de los fenómenos.

⁴ A diferencia del *instrumentalismo científico*, el *realismo científico*, en términos muy generales, considera que los postulados de la ciencia sí buscan decir algo acerca de la realidad más allá de los fenómenos y que las teorías científicas exitosas de hecho están diciendo *algo correcto* con respecto a tal realidad. Qué es aquello acerca de lo cual estamos justificados en pensar que la ciencia está en lo correcto —y qué no— es algo que los filósofos de la ciencia llevan discutiendo por décadas. El debate en relación con el realismo científico es amplio y con muchísimos matices que no podemos abordar en este momento. Valga este comentario sólo para dar una definición somera de *realismo científico* y para señalar que en este punto no es necesario asumir un compromiso fuerte y específico en ese sentido, más allá de esta definición general.

y cómo es aquello que hay. La teoría dice que detrás de lo que observamos hay, o puede haber, determinadas cosas y, para justificarlo, se basa en la adecuación empírica de las predicciones que se construyen sobre la postulación de tales elementos. De cualquier manera, a pesar del éxito de una teoría, la ciencia no puede (o ni siquiera busca, pues ésa no es necesariamente su tarea) llegar a establecer de manera explícita que la ontología que propone es, de hecho, real; es ahí donde empieza el trabajo de la metafísica.

La ciencia y la metafísica pueden considerarse complementarias en el objetivo de dar respuesta a la pregunta acerca de lo que hay. Las ciencias proponen explicaciones de la constitución y el comportamiento de sus objetos de estudio particulares y para esto postulan teorías, ontologías y leyes que operan dentro de un contexto específico; mientras que la metafísica describe lo que hay en un sentido fundamental y más general. Las ciencias describen objetos, propiedades y leyes que son particulares a su campo de estudio; mientras la metafísica intenta definir qué son tales cosas y qué papel juegan en la constitución de la realidad. Al ser más general, la metafísica también tiene la tarea de proveer un marco de referencia dentro del cual puedan encajar las diferentes ciencias; una base estructural que permita entender cómo se relacionan entre sí y cómo ha de entenderse el estatus ontológico de sus diversos objetos de estudio, asumiendo que todas están intentando hablar acerca de la misma realidad.

Nótese que al hablar de ciencia y metafísica como complementarias, se está asumiendo que corresponden a dos tipos de quehacer intelectual diferentes. Aunque puede haber alguna intersección entre sus dominios de estudio, es claro que cada una de ellas pretende investigar cuestiones diferentes acerca de tales objetos y, por lo mismo, es de esperarse que sus metodologías no puedan ser exactamente las mismas. La ciencia busca explicar fenómenos dando por sentado o no reflexionando mucho acerca de si existe o no una realidad más allá de ellos, o en qué consiste la causalidad que se supone que da lugar a los mismos, o sobre

el estatus metafísico de los entes que postula... Por su parte, la metafísica intenta determinar qué es lo que hay detrás de tales fenómenos, por ejemplo: cuál es la naturaleza de las leyes que la ciencia busca; cómo deben entenderse las relaciones de causalidad y fundamentación ontológica; qué constreñimientos modales dan lugar a la realidad; etc. Siendo, pues, dispares sus objetivos, no es de sorprender que cada una de ellas deba aplicar una metodología diferente en sus investigaciones. ¡Pero esto pasa incluso al interior de la ciencia misma! Hoy en día, los filósofos de la ciencia están de acuerdo en que no existe un único método científico, sino que los métodos y herramientas que utilizan las diferentes ciencias en sus investigaciones se ajustan incluyendo, eliminando o modificando elementos en función de las necesidades específicas de su objeto de estudio. Así pues, en lo que respecta al método, las ciencias comparten un cierto “aire de familia” en el sentido Wittgensteiniano, más que un conjunto de características necesarias y suficientes que lo delimiten. En la siguiente sección retomaré esta idea para sentar una postura sobre la relación entre los métodos de la ciencia y de la metafísica.

Ahora bien, mientras hay un sentido evidente en el que puede decirse que la ciencia es ampliamente exitosa, históricamente la metafísica no puede jactarse de haber gozado de tal privilegio. Dado que sus conclusiones difícilmente pueden ponerse a prueba y que, en muchos casos, sus discusiones han parecido a muchas oscuras y sin sentido⁵ —por no mencionar la poca rigurosidad con la que a veces han parecido aplicarse las herramientas con las que cuenta—, la reputación de la metafísica se ha visto seriamente afectada. Tanto en círculos científicos como filosóficos, a la metafísica se le mira con cierto recelo; hasta el punto, incluso, de

⁵ Cuando se hace este tipo de críticas a la metafísica tradicional, se suele recurrir a ejemplos como el de la famosa pregunta “¿cuántos ángeles caben en la cabeza de un alfiler?” para intentar mostrar lo absurdos que pueden llegar a ser algunos proyectos metafísicos. Aunque caer en estos términos puede ser exagerado, y más si queremos hablar de metafísica contemporánea, lo cierto es que por casos como éstos la metafísica se hizo de una muy mala reputación en algunos círculos científicos y filosóficos, y actualmente, hasta cierto punto, sigue sufriendo las consecuencias.

haberse emprendido cruzadas en su contra, como es el caso bien conocido de los positivistas lógicos durante la primera mitad del siglo XX.

Habiendo puesto en tela de juicio la pertinencia del método clásico para hacer metafísica y reconociendo el potencial de los métodos de la ciencia para acceder al mundo e intentar obtener verdades de él, la solución que algunos han propuesto para que no se trunque el proyecto metafísico es buscar hacer lo que se ha llamado *metafísica naturalista*. La idea es hacer que la investigación metafísica no sólo esté constreñida por los resultados de la mejor ciencia actual, sino que utilice metodologías cercanas a las que utilizan las ciencias naturales en la construcción de sus teorías, para evitar, así, la especulación ontológica *a priori* que tanta desconfianza genera.

El argumento para proponer una naturalización de la metafísica puede resumirse, entonces, como sigue: la metafísica, con su metodología tradicional, ha resultado con frecuencia en especulaciones falsas o vacías que no parecen contribuir en nada al conocimiento acerca de la realidad; un cambio sustancial en la metodología podría ser la vía para revitalizar dicha disciplina. Queremos que la metafísica goce de buenas bases tanto metodológicas como evidenciales para el desarrollo de sus tesis. La ciencia es exitosa en la construcción de sus teorías, las cuales son apoyadas por evidencia empírica. Dado que tanto la ciencia como la metafísica tienen objetos de estudio estrechamente relacionados, probablemente apelar a los resultados y métodos de la ciencia resulte efectivo para hacer una metafísica provechosa.

2. El compromiso naturalista

La tradición filosófica naturalista, como ya he dicho, considera que la filosofía debe entenderse y desarrollarse como una disciplina comprometida con las ciencias naturales. Dicho compromiso puede asumirse de dos modos distintos que no son excluyentes (Papineau, 2016), a saber, un *naturalismo ontológico* o un *naturalismo metodológico*.

El compromiso del *naturalismo ontológico* tiene que ver, como su nombre lo indica, con el tipo de ontología que se va a aceptar como constituyente de la realidad. En este sentido, el naturalista se compromete con que la realidad está compuesta por entidades naturales —del tipo que postulan las ciencias naturales—, en oposición a cualquier tipo de entidad “sobrenatural”, cuyos supuestos efectos físicos sean inexplicables o misteriosos. El interés del naturalista, en este caso, es poder dar cuenta de cómo es que las entidades que postula tienen efectos en el mundo físico. Así, por ejemplo, lo mental está constituido, en último término, por entidades físicas porque, según las restricciones de las ciencias naturales, es la única forma en la que puede tener efectos físicos sin la acción de poderes misteriosos que “saltan” de un tipo de entidad a otro —es decir, de entidades sobrenaturales a entidades naturales o al revés—. Así pues, una teoría metafísica ontológicamente naturalista se caracteriza porque postula entidades con poderes causales que son *idénticas a* o están *constituidas por* entidades físicas, es decir, se compromete con un *fisicalismo* que responde al principio de *cierre causal*: nada puede tener un poder causal con efectos físicos, si no está en sí mismo físicamente constituido.

Ahora bien, es importante señalar que este compromiso ontológico no tiene que ser necesariamente reduccionista, es decir, no impone necesariamente que las propiedades instanciadas por las entidades especiales postuladas por el filósofo naturalista tengan que tener una identidad estricta con propiedades físicas. Un fisicalismo no-reduccionista sigue cumpliendo con el principio de cierre causal cuando se compromete con que la instanciación de propiedades especiales está *metafísicamente determinada* por la instanciación de propiedades físicas, sin exigir identidad estricta entre propiedades especiales y propiedades físicas. Esto tiene la ventaja de que permite dar cuenta de casos en los que el reduccionismo de causas resulta demasiado restrictivo, por ejemplo:

La identidad tipo acerca de pensamientos implicaría que la propiedad de pensar acerca de la raíz cuadrada de dos es idéntica con alguna propiedad física. Y esto parece altamente implausible. Incluso si todos los humanos con este pensamiento tuvieran que distinguirse por alguna propiedad física común en sus

cerebros —lo que en sí mismo parece improbable—, todavía queda el argumento de que otras formas de vida, o androides inteligentes, podrían pensar acerca de la raíz cuadrada de dos, incluso si sus cerebros pueden no compartir ninguna propiedad física relevante con el nuestro. (Papineau, 2016)⁶

Según el reduccionista, el problema con el fisicalismo no-reduccionista es que multiplica inaceptablemente las causas de los efectos físicos que resultan de la operación de causas especiales. Si las propiedades especiales —que dan lugar a las causas especiales— no se reducen estrictamente a propiedades físicas, el resultado es que ya no tendríamos solamente causas físicas, sino también causas especiales y eso iría en contra del espíritu del principio de cierre causal. Frente a esta crítica, el antirreduccionista se mantiene en que al sentar el requerimiento de que las propiedades especiales *supervengan*⁷ de propiedades físicas, garantiza que no haya proliferación metafísica, pues las propiedades especiales no son genuinamente adicionales a las propiedades físicas: unas y otras no son metafísicamente distintas.⁸

Por otra parte, el compromiso del *naturalismo metodológico* tiene que ver con la manera en la que se lleva a cabo la práctica filosófica. Como se introdujo en la sección anterior, la idea del naturalista, en este caso, es que la empresa filosófica no es radicalmente distinta de la empresa científica: ambas coinciden en su objeto de estudio y persiguen fines similares y complementarios, por lo que sus métodos deberían, también, ser similares. Aun cuando se reconoce que la filosofía se diferencia de la ciencia —por ejemplo, en que la filosofía no recopila

⁶ Todas las citas que hago en el presente trabajo cuya fuente está en inglés han sido traducidas por mí.

⁷ La relación de *superveniencia* es una relación metafísica asimétrica de dependencia entre propiedades. Un grupo de propiedades A *superviene a* un grupo de propiedades B, si las propiedades A (propiedades supervenientes) están metafísicamente determinadas por las propiedades B (propiedades base). Si dos objetos difieren en sus propiedades supervenientes, necesariamente difieren en sus propiedades base. Dos objetos pueden tener las mismas propiedades supervenientes y diferir en sus propiedades base, pero no pueden tener las mismas propiedades base y diferir en sus propiedades supervenientes, de ahí la asimetría.

⁸ Esta aclaración resulta importante en este trabajo puesto que, como ya he mencionado, la propuesta metafísica naturalista de Lewis que pretendo estudiar se basa en una tesis de superveniencia.

datos empíricos a la manera de los científicos—, se parte del supuesto de que ambas tienen como objetivo establecer conocimiento acerca del mundo natural por medio de una investigación *a posteriori* —en contraposición al método casi exclusivamente *a priori* que solía asociarse a la filosofía tradicional—. Tanto la ciencia como la filosofía buscan dar explicaciones que permitan simplificar las teorías por medio de las cuales pretendemos dar cuenta del mundo que experimentamos y que sean consistentes con la evidencia empírica.

Para el naturalista metodológico, la principal diferencia entre ciencia y filosofía no está, pues, ni en los objetivos ni en los métodos de ambos tipos de disciplina, sino en que se enfocan en cuestiones distintas del mismo objeto de estudio, a saber, el mundo natural. Como se mencionó anteriormente, la filosofía se preocupa por cuestiones más generales de las que se preocupa la ciencia. Mientras la ciencia se preocupa, por ejemplo, por identificar los factores y mecanismos específicos que causan el calentamiento global, la filosofía se preocupa por la naturaleza de la relación de causación misma; o mientras la ciencia se preocupa por identificar las propiedades del electrón, la filosofía se preocupa por intentar explicar qué significa poseer una propiedad o qué son las propiedades.

La similitud entre los métodos de la ciencia y la filosofía consiste en que en ambos casos se parte de la identificación de un fenómeno que necesita explicación y posteriormente se recopila evidencia empírica a partir de la cual se propone la mejor explicación posible para dicho fenómeno (García-Ramírez, 2015, pág. 8). Algunos han criticado al naturalismo metodológico diciendo que mientras la corrección de una tesis científica se determina a través de la experiencia, en el caso de la filosofía no existe observación alguna que pueda hacerse para contrastar la verosimilitud de una tesis filosófica o para dirimir entre dos teorías filosóficas rivales. Por lo tanto, en este punto —continúa la crítica—, la metodología filosófica tendría que separarse de la metodología científica recurriendo a un método *a priori* como la intuición.

Para responder a la anterior crítica quiero empezar señalando dos aspectos de la investigación científica y filosófica que la debilitan. Por un lado, si tenemos en cuenta el problema de la inducción, no es claro que la corrección de una tesis científica quede definitivamente determinada por la experiencia, pues si bien puede haber observaciones que permitan descartar cierta tesis, no existe evidencia empírica alguna que permita confirmarla de una vez y para siempre; de hecho, la historia de la ciencia registra múltiples ejemplos de abandono y sustitución de teorías científicas que contaban con una amplia trayectoria de evidencia empírica a su favor. Ahora bien, contrario a lo que parecen pensar sus críticos, las tesis filosóficas naturalistas también pueden estar expuestas a ser refutadas por la experiencia; el filósofo naturalista, en este caso, se compromete a dar un lugar prioritario a la evidencia empírica por encima de cualquier supuesto teórico.

Por otro lado, nos encontramos con el problema de la *subdeterminación* de teorías por la experiencia. El problema consiste en que si tenemos dos o más teorías en competencia, es posible que la evidencia empírica sea perfectamente compatible con todas ellas. En ese caso, la experiencia no permite dirimir entre dos teorías científicas rivales como suponen los críticos del naturalismo metodológico que pasa en la ciencia y no en la filosofía. En dichas situaciones, tanto la ciencia como la filosofía tienen que hacer uso de herramientas distintas a las de la evidencia empírica para elegir entre teorías rivales.

Aunque en este tipo de discusiones suele asumirse que la *intuición* está en contraposición al método distintivamente *a posteriori* de la ciencia, considero que, aun siendo el caso de que ésta cumpla un papel fundamental para la filosofía, eso no necesariamente la aleja del compromiso naturalista. Por un lado, hay buenas razones para pensar que la intuición no es un método puramente *a priori* como típicamente se ha asumido, sino que tiene, inevitablemente, un

componente experiencial no trivial.⁹ Por otro lado, hay un sentido relevante en el que la ciencia misma hace uso de intuiciones a la hora de plantear explicaciones o elegir entre teorías:

Asumiendo que las teorías científicas en competencia son aproximadamente empíricamente equivalentes, o al menos empíricamente aceptables, la selección de una teoría sobre sus competidoras está determinada por una mezcla de *desiderata*, incluyendo su valor explicativo general, que es evaluado, en parte, por su simplicidad, elegancia y ajuste con teorías previamente aceptadas, intuiciones y asunciones. Éste es un punto en el que el razonamiento *a priori* y la inferencia a la mejor explicación juegan un papel importante. (Paul, 2012, pág. 11)

Como vemos, la ciencia —al igual que la filosofía— tiene en cuenta no sólo la evidencia empírica, sino también otros criterios pragmáticos y virtudes teóricas al momento de postular y elegir entre teorías. El planteamiento y priorización de dichos criterios y virtudes —como, por ejemplo, los mencionados en la cita anterior: “simplicidad, elegancia y ajuste con teorías previamente aceptadas”— se basan, entre otras cosas, en la intuición y el sentido común. Así pues, contrario a lo que pretende defender la crítica, incluso al momento de juzgar la corrección de una tesis o teoría, tanto la ciencia como la filosofía comparten aspectos metodológicos fundamentales. Dado esto, y teniendo en cuenta las consideraciones previas acerca de sus métodos y objetos de estudio, es posible sostener y comprometerse con una continuidad metodológica entre la ciencia y la filosofía según los objetivos del naturalismo metodológico.

Ahora bien, dicho todo esto, me encuentro al fin en la posición de afirmar que el trabajo que aquí presento consiste en una investigación filosófica de corte naturalista que se compromete en los dos aspectos mencionados en esta sección: por un lado, me comprometo exclusivamente con entidades que se adhieren al principio fisicalista de cierre causal —naturalismo ontológico— y, por otro lado, utilizo una metodología que está en continuidad con la metodología científica —naturalismo metodológico—. Tomo como punto de partida la evidencia dada por los resultados teóricos y experimentales de la mejor ciencia actual, con miras

⁹ Ver (Williamson, 2013).

a resolver un problema filosófico que surge en el seno de una teoría metafísica de aspiraciones naturalistas, a saber, el problema que la mecánica cuántica le impone a la tesis de superveniencia humeana de David Lewis.

3. El proyecto metafísico de David Lewis

El proyecto metafísico de David Lewis puede entenderse como un intento de dar solución al reto de Quine acerca de la posibilidad de una metafísica modal satisfactoria, es decir, como un intento de responder a la pregunta de si “es posible dar cuenta, siguiendo las restricciones naturalistas [...], del papel que desempeñan las propiedades modales (*i.e.*, la posibilidad, la contingencia y la imposibilidad) en la ciencia total” (García-Ramírez, 2015, pág. 28). La apuesta de Quine —precursor de la tradición naturalista— es que no es posible ser naturalista y defender que las propiedades modales son propiedades de objetos. Según su argumento, las propiedades modales, que intuitivamente nos parece que son propiedades de objetos —por ejemplo, una propiedad modal de la luz sería que *necesariamente* su velocidad es de 300000 km/s—, son, en realidad, propiedades de la manera en la que designamos —nombramos o nos referimos— a los objetos y no de los objetos mismos. Para llegar a esta afirmación, Quine argumenta mostrando que dentro de los contextos modales la asignación de propiedades modales sobre un mismo objeto puede cambiar dependiendo de la manera en la que el objeto se designe. De ahí se sigue que las propiedades modales no son genuinamente atribuibles a objetos. A partir de esto, el reto de Quine consiste, entonces, en mostrar cómo es posible hacer metafísica modal respetando un compromiso naturalista.

El naturalismo que requiere Quine para la resolución del reto propuesto —y al que su discípulo David Lewis intentará apegarse— se compromete con los dos aspectos identificados en la sección anterior. Por un lado, asumiendo un naturalismo metodológico, Quine sostiene que cualquier intento de obtener conocimiento, incluido el conocimiento filosófico, está sujeto a los estándares de

evidencia y justificación que son implementados de manera particularmente exitosa en las ciencias naturales (Hylton & Kemp, 2020). Cabe hacer notar que —en consonancia con lo que defendí en la sección anterior— el conocimiento científico, para Quine, no es de un tipo diferente al del conocimiento ordinario:

La ciencia no es un sustituto del sentido común, sino una extensión del mismo. [...] Negar la esencia misma del sentido común, exigir pruebas de lo que tanto el físico como el hombre de a pie aceptan como trivialidad, no es un perfeccionismo loable; es una confusión pomposa, una falta de observación de la sutil distinción entre el bebé y el agua de la bañera.

[...] El científico es indistinguible del hombre de a pie en su sentido de la envidia, excepto en que el científico es más cuidadoso. (Quine, 1957, pág. 2 y ss.)

Por otro lado, con respecto al naturalismo ontológico, Quine reconoce dentro de la ontología de la ciencia no sólo *objetos físicos*, sino también algunos *objetos abstractos* que cumplen un papel estructural indispensable dentro de las teorías científicas, entre los que se cuentan: relaciones entre objetos físicos; clases de objetos físicos; clases de clases de objetos físicos; objetos matemáticos; clases de estos dominios combinados; etc. Siguiendo esta idea:

Quine buscaba poner las afirmaciones de existencia de la filosofía a la par con aquellas de las ciencias naturales. Las afirmaciones de existencia hechas dentro de las teorías científicas están garantizadas sólo en caso de que sean indispensables para una mejor teoría general. Un filósofo naturalista, que busca una filosofía continua con la ciencia empírica y teórica, similarmente tiene buenas razones para creer en los objetos que son mencionados en la afirmación más completa y clara de su mejor teoría. (Janssen-Lauret, 2017, pág. 252)

Ahora bien, el realismo modal de Lewis se caracteriza por ser una teoría clara, simple, unificadora y con un amplio poder explicativo, lo que la posiciona como una de las teorías metafísicas más relevantes de la actualidad. Como mencioné en la sección anterior, la búsqueda de este tipo de características o virtudes teóricas cumple un papel indispensable dentro del método científico y el hecho de que Lewis decida adoptar dicha guía para el desarrollo de su proyecto filosófico es muestra de su interés por alinearse con un naturalismo metodológico.

La principal virtud del realismo modal consiste en que, partiendo de una base metafísica simple y —pretendidamente— en consonancia con la ciencia, consigue dar cuenta de nociones metafísicamente retadoras como lo son las nociones modales de posibilidad, necesidad y contingencia que exige el reto de Quine, pero también otras igualmente importantes como las de significado, propiedades, contrafácticos, causalidad o leyes de la naturaleza. Después de hacer un análisis detallado de las principales objeciones y alternativas a la teoría del realismo modal, Lewis (1986a) afirma que, si bien no hay argumentos concluyentes que obliguen a aceptar su teoría, hay buenas razones para considerarla correcta a partir una inferencia a la mejor explicación. En este sentido, el método filosófico de Lewis también se adecúa a los estándares de justificación de la ciencia, pues la inferencia a la mejor explicación, o *argumentación abductiva*, es una de las herramientas fundamentales del método científico.

Con respecto a los compromisos ontológicos, retomemos la cita anterior acerca de la postura de Quine: “Un filósofo naturalista, que busca una filosofía continua con la ciencia empírica y teórica, [...] tiene buenas razones para creer en los objetos que son mencionados en la afirmación más completa y clara de su mejor teoría”. Si aceptáramos el argumento abductivo de Lewis y reconociéramos al realismo modal como la mejor teoría metafísica y, además, estuviéramos de acuerdo en que dicha teoría es una teoría filosófica continua con la ciencia empírica y teórica, entonces habría buenas razones para creer en los objetos postulados por el realismo modal, es decir, habría buenas razones para aceptar la existencia de mundos posibles concretos.

Como veremos, la base metafísica que da lugar a los mundos posibles en la teoría de Lewis consta de una ontología simple que intenta apearse a los requisitos naturalistas de Quine;¹⁰ no postula entidades que violen el principio

¹⁰ Si bien considero que hay buenas razones para sostener que Lewis es naturalista a la Quine, no es éste el lugar para defenderlo a profundidad, pues para los objetivos del presente trabajo

fisicalista de cierre causal¹¹ o relaciones misteriosas de conexión necesaria. La manera en la que Lewis pretende mostrar que es posible hacer metafísica modal naturalista —esto es, su propuesta de solución al reto de Quine— descansa fundamentalmente en dos principios: la tesis de *superveniencia humeana* y el principio de *recombinación*.

Si bien muchos piensan que el realismo modal de Lewis no podría considerarse una “metafísica simple” porque multiplica indiscriminadamente los entes al aceptar como reales y concretos todos los infinitos mundos posibles, no es ése el sentido en el que quiero decir que la base metafísica del proyecto de Lewis es simple. Su simplicidad radica, precisamente, en lo que se propone en la tesis de superveniencia humeana. Ya que esta tesis será estudiada a detalle más adelante, baste por el momento con mencionar la idea general de la misma, a saber: que un mundo no es más que un arreglo de puntos en el espacio-tiempo en los que se instancian intrínsecamente propiedades físicas fundamentales —nótese la inspiración científica de la propuesta— y que absolutamente todo lo demás superviene a ello. Así, por ejemplo, lo que conocemos como *leyes de la naturaleza* resulta no ser más que patrones o regularidades dentro del “mosaico humeano” —el arreglo de puntos espaciotemporales—. Si, además de lo anterior, se tiene en cuenta la otra tesis metafísica fundamental del realismo modal, a saber, el principio de recombinación —por medio del cual se establece cómo se

resulta suficiente reconocer las aspiraciones naturalistas de la propuesta de Lewis, aun cuando éstas no correspondan perfectamente con el naturalismo de Quine. Para más argumentos a favor del naturalismo de Lewis ver: (García-Ramírez, 2015), (Janssen-Lauret, 2017).

¹¹ La afirmación de que la base ontológica de la metafísica de Lewis cumple con el principio fisicalista de cierre causal —a saber, que nada puede tener un poder causal con efectos físicos, si no está en sí mismo físicamente constituido— puede ser criticada si se asume que dicho principio sólo acepta entidades que están causalmente conectadas con el mundo actual porque es el mundo del que hablan nuestras mejores teorías científicas. Sin embargo, considero que tal asunción no hace parte del principio mencionado. Lo que prohíbe el principio de cierre causal es la postulación de causas sobrenaturales con efectos físicos, lo cual, definitivamente, no ocurre en la teoría del realismo modal. Cada mundo posible es un mundo real, concreto, compuesto por entidades físicas —del tipo de las postuladas por las ciencias naturales— dentro de un espacio-tiempo físico asociado a dicho mundo. El hecho de que los objetos y el espacio-tiempo de los diferentes mundos posibles no se conecten causalmente entre sí ni con el mundo actual no supone una violación del principio de cierre causal.

construyen todos los mundos posibles—, se puede llegar a dar cuenta de nociones como las de causalidad, posibilidad, necesidad y contrafácticos.

El principal problema con la teoría de Lewis, señalan algunos críticos (Ladyman & Ross, 2007, pág. 19), es que está basada en una visión científica del mundo que, para el momento de ser presentada, ya había sido refutada por la mecánica cuántica. Tim Maudlin (2007), por ejemplo, señala que la tesis de superveniencia humeana supone que el estado físico del mundo está determinado por las propiedades intrínsecas de cada punto del espacio-tiempo y las relaciones entre ellos, pero la mecánica cuántica nos enseña que esta idea es cuestionable. La teoría cuántica describe sistemas de partículas que se encuentran en lo que se conoce como *estados enredados*¹², cuya característica principal consiste en que no es posible hablar de las propiedades de cada una de las partículas en el sistema sin hablar del sistema completo. Lo que hay es un sistema que presenta cierto comportamiento, pero no se puede hablar independientemente de cada partícula, como supone la tesis de Lewis.

Vale la pena mencionar que no es el caso que Lewis no estuviera al tanto de los avances de la ciencia de su época, sino que explícitamente decidió hacer caso omiso de ellos señalando que la mecánica cuántica tenía problemas conceptuales por resolver y que, por lo tanto, no era una teoría científica estable. Aunque en esto último no se equivocaba, el impresionante éxito de la teoría cuántica hacía prever que su carácter revisionista de nuestra imagen del mundo estaba bien encaminado, por lo que sus críticos podrían señalar que tal “excusa” no era del todo satisfactoria. Independientemente de si el señalamiento de sus críticos en este caso es justo o no, el objetivo de mi investigación consistirá en buscar una solución a la aparente incompatibilidad entre la tesis de superveniencia humeana y la mecánica cuántica. La principal motivación, como ya he adelantado, es que el proyecto metafísico de Lewis se ha convertido en la

¹² La noción de “estado enredado” se estudia en el capítulo II del presente trabajo.

piedra angular para muchas propuestas en diversas áreas de la filosofía contemporánea y, dado que la tesis de superveniencia humeana cumple un papel fundamental en dicho proyecto, resulta relevante, en este momento, intentar validarla desde una metafísica comprometida con la ciencia.

Es importante señalar que, a pesar de la inconsistencia que parece haber entre la tesis de superveniencia humeana y la mecánica cuántica, hay razones fuertes para seguir considerando la metafísica de Lewis como un proyecto naturalista. En primer lugar, como ya he mencionado, la ontología que postula es del mismo tipo que la ontología que postula la ciencia; los objetos que postula son causalmente eficaces en el mismo sentido que los objetos de las ciencias naturales. Los mundos posibles no son objetos abstractos o sobrenaturales, sino que son objetos concretos espaciotemporales. Por otro lado, su metodología es naturalista no sólo porque utiliza la inferencia abductiva y se compromete exclusivamente con las teorías que ofrecen las explicaciones más simples y unificadoras, sino porque busca ser consistente con el conocimiento científico. Incluso hay argumentos que defienden que el realismo modal es una teoría con evidencia empírica a su favor. Por ejemplo, en el *Estudio introductorio* que presenta Eduardo García-Ramírez a su traducción de *On the Plurality of Worlds* (Lewis, 1986a), el autor defiende que:

[...] una parte de la evidencia empírica a favor del realismo modal es el hecho de que los juicios modales de las ciencias naturales (p.ej., que nada en el universo puede viajar más rápido que la luz) son verdaderos independientemente del realismo modal. (García-Ramírez, 2015, pág. 9)

El argumento consiste en que el realismo modal, fiel a su compromiso naturalista metodológico, tiene como objetivo dar cuenta de un fenómeno natural, a saber, el éxito de los juicios modales y causales, particularmente evidenciado en las explicaciones, afirmaciones y predicciones científicas que se basan en ellos. La propuesta de Lewis consiste en afirmar que la mejor explicación para el éxito de dichos juicios es que son literalmente verdaderos y, aparentemente, la única forma en la que pueden ser literalmente verdaderos es

aceptando el realismo modal. De esta manera, que los juicios modales resulten exitosos constituye evidencia empírica a favor del realismo modal (García-Ramírez, 2015, pág. 79).

Ahora bien, como el mismo Lewis reconoce, podría ser el caso que el realismo modal no sea la mejor explicación posible para los fenómenos que su metafísica intenta explicar, por ejemplo, una teoría igual de simple y unificadora que la suya y que, además, tenga la ventaja de ser más parsimoniosa. Lewis dedica el tercer capítulo de *On the Plurality of Worlds* a analizar las principales teorías alternativas disponibles, mostrando que ninguna cumple con tales características. Obviamente, el hecho de que Lewis no encuentre una teoría mejor no quiere decir que no exista, pero, como afirma García-Ramírez:

Si queremos defender, como parece natural, que los juicios y afirmaciones causales y modales (y quizá en menor grado la atribución de contenidos y propiedades) son literalmente verdaderos (como los no causales ni modales), todo naturalista encontrará una enorme dificultad en superar la explicación que ofrece el realismo modal. (García-Ramírez, 2015, pág. 84)

Volviendo a la tesis de superveniencia humeana, hasta ahora me he concentrado en hablar de ella como uno de los principios fundamentales del proyecto metafísico general de Lewis, esto con el objetivo de justificar el gran interés filosófico que puede haber en tratar de reconciliar dicha tesis con nuestra mejor ciencia actual. Pero, aparte de eso, la tesis de superveniencia humeana también constituye la base de una de las propuestas más relevantes dentro de la discusión actual acerca de cuál es el estatus metafísico de las leyes de la naturaleza. Así pues, el problema de la aparente inconsistencia entre la tesis de superveniencia humeana y la mecánica cuántica no sólo pondría en jaque al realismo modal como sistema metafísico, sino que, como veremos, despojaría a la filosofía de una de las concepciones más relevantes acerca del estatus ontológico de las leyes de la naturaleza.¹³

¹³ Aunque en la discusión sobre leyes de la naturaleza suele hablarse de la tesis de superveniencia humeana sin hacer mención al realismo modal, considero que las convicciones metafísicas fundamentales de un defensor de la noción lewisiana de leyes de la naturaleza

La pregunta por el carácter ontológico de las leyes de la naturaleza es una cuestión de especial interés no sólo para la metafísica, sino para otras áreas de la filosofía contemporánea como la filosofía de la ciencia general o la filosofía de ciertas ciencias particulares. De hecho, como mencioné al principio de esta introducción, uno de los problemas a los que se ha enfrentado la filosofía de la física durante los últimos años consiste en dar cuenta del estatus ontológico de un elemento teórico particularmente importante dentro de la mecánica cuántica, a saber: la función de onda. Entre las propuestas que se están discutiendo, una de las más fuertes defiende que la función de onda es un elemento nomológico y que, como tal, su naturaleza metafísica corresponde con la naturaleza metafísica de las leyes naturales (Dürr, Goldstein, & Zanghì, 1997). Asumir esta postura sin tener una noción clara de lo que son —o no son— las leyes de la naturaleza, lo único que lograría sería trasladar el problema de una noción a otra. Dado que para resolver el problema que me interesa en este trabajo es indispensable asumir una interpretación metafísica de la mecánica cuántica y que, según lo que acabo de mencionar, tener una noción clara de lo que son las leyes de la naturaleza resultará fundamental para lograrlo, entonces, la discusión metafísica acerca de las leyes naturales se convierte en un punto ineludible dentro de mi investigación.

4. Esquema de la investigación

Después de reconocer algunas de las virtudes más importantes de la tesis de superveniencia humeana, considero que la reacción ante la aparente incompatibilidad de dicha tesis con la mecánica cuántica no debería ser desecharla inmediata y exclusivamente por este motivo, como han querido

—como la negación de conexiones necesarias o de modalidad metafísicamente fundamental— son de tal índole que difícilmente podría construir el resto de su postura metafísica sin recurrir al realismo modal. Es por esta razón que mi motivación para intentar salvar la tesis de superveniencia humeana del reto que le impone la mecánica cuántica no se limita al papel que juega dicha tesis en la discusión sobre leyes de la naturaleza como algo independiente, sino como un elemento de un sistema metafísico general.

recomendar algunos de sus críticos más fuertes; en lugar de eso, y por tal razón, el objetivo general de mi investigación consiste en buscar una solución al reto que la teoría de la mecánica cuántica le impone a la tesis de superveniencia humeana. Durante el desarrollo de dicha propuesta no sólo se hace evidente la importancia de sentar una postura frente al problema del estatus metafísico de la función de onda, sino el hecho de que la solución de ambos problemas está íntimamente relacionada: la posible solución de un lado delimita la posible solución del otro.

En el capítulo I de este trabajo, realizo un estudio de las principales propuestas metafísicas dirigidas a definir el estatus ontológico de las leyes de la naturaleza. Me concentro particularmente en encontrar una propuesta que respete los compromisos naturalistas admitidos previamente en esta introducción, con el objetivo de dotar a la filosofía de la ciencia de una noción metafísica de ley de la naturaleza que pueda tomarse como base para abordar otro tipo de problemas que asumen la existencia de tales leyes. En este capítulo, comparo la noción de ley de la naturaleza que se construye a partir de la tesis de superveniencia humeana con otras propuestas alternativas, identifico sus fortalezas y presento el argumento que ha servido como base para declarar la supuesta incompatibilidad de la tesis de superveniencia humeana con la mecánica cuántica.

Teniendo claro que la tesis de superveniencia humeana, tal y como está definida, es incompatible con la mecánica cuántica, resulta necesario entrar a estudiar específicamente dicha teoría con el objetivo de identificar la fuente de la incompatibilidad y poder sortearla. En el capítulo II presento los principios fundamentales de la teoría cuántica. A pesar de su innegable éxito predictivo, el formalismo cuántico tiene una falla conceptual que se conoce como *el problema de la medición*. Me concentro en dicho problema y en sus posibles soluciones, a saber, las llamadas “interpretaciones” de la mecánica cuántica que, como veremos, no son otra cosa que teorías alternativas que coinciden en sus

predicciones exitosas, pero que sugieren diferentes visiones metafísicas de lo que está diciendo la teoría cuántica. Me dedico particularmente a las llamadas interpretaciones de *mecánica cuántica bohmiana* y de *colapso objetivo*, con el objetivo de tomarlas como base para la propuesta de una superveniencia humeana compatible con mecánica cuántica.

En el capítulo III, abordo el problema de la naturaleza metafísica de uno de los elementos fundamentales de la mecánica cuántica, a saber, la *función de onda*. La función de onda cumple un papel esencial dentro de la teoría cuántica. La dificultad de definir su estatus ontológico se ha convertido en una de las cuestiones más discutidas dentro de la filosofía de la física de los últimos años. El principal problema gira en torno al espacio físico en el que se supone que la función de onda debería “vivir”, si se considera como un elemento de realidad; pues su representación matemática sugiere que la función de onda “vive” en un espacio altamente dimensional¹⁴ y no en el espacio tridimensional ordinario. Tener un panorama general de las posibilidades con respecto a esta cuestión resulta relevante en mi objetivo de darle sentido a la tesis de superveniencia humeana, pues, como mostraré, ambas cuestiones no se pueden resolver de manera independiente, sino que su definición metafísica se delimita mutuamente.

Finalmente, en el capítulo IV, presento una propuesta específica para compatibilizar la tesis de superveniencia humeana con la mecánica cuántica. Empiezo por estudiar las propuestas de otros autores en este sentido. Finalmente, tomando como base algunas de las conclusiones obtenidas en los capítulos anteriores, planteo mi propuesta haciendo énfasis en las ventajas que presenta frente a las otras propuestas sobre la mesa. En particular, defiendo una visión metafísica de la función de onda como una propiedad física fundamental no-local. Con esto definido, extiendo el requerimiento lewisiano para que

¹⁴ En particular se considera un espacio de $3N$ dimensiones, siendo N el número de partículas del universo. Ver capítulo II del presente trabajo.

abarque no sólo propiedades fundamentales locales, sino también propiedades fundamentales no-locales o distribuidas. De esta manera, la superveniencia humeana supera su problema con la mecánica cuántica y puede ser considerada una tesis metafísica comprometida con la ciencia en el sentido especificado en esta introducción.

CAPÍTULO I

LEYES DE LA NATURALEZA

En el presente capítulo me concentro en realizar un estudio de las principales propuestas sobre la mesa con respecto al estatus metafísico de las leyes de la naturaleza. Identifico el papel que juega la tesis de superveniencia humeana en esta discusión y me concentro en la crítica más fuerte que suele dirigirse contra ella, a saber, su supuesta incompatibilidad con la mecánica cuántica. Finalmente, señalo las ventajas que la propuesta del humeanismo acerca de leyes presenta frente a sus contendoras y motivo, así, mi interés en investigar acerca de la posibilidad de reconciliar la tesis de superveniencia humeana con la mecánica cuántica.

1. ¿Qué son las leyes de la naturaleza?

Uno de los objetivos que típicamente se le atribuye a la ciencia tiene que ver con el hecho de que ésta, a través de sus teorías, intenta explicar la ocurrencia de fenómenos naturales. Observamos que los fenómenos naturales presentan ciertas regularidades: por ejemplo, en condiciones normales, siempre que se calienta una barra de hierro su longitud aumenta. Esperamos que la investigación científica pueda explicarnos el porqué de tales regularidades. Es decir, esperamos que la ciencia nos diga qué es lo que hay detrás de un conjunto de fenómenos que conservan las mismas relaciones entre sus componentes y cómo es que al identificar elementos similares en otro momento o lugar, podemos predecir acertadamente que dichas relaciones ocurrirán. Las teorías científicas, entonces, no sólo pretenden predecir correctamente los resultados de un

experimento o de una secuencia de eventos naturales, sino que intentan responder a preguntas del tipo *cómo* o *por qué* ocurre cierto fenómeno.¹⁵

En términos generales, al construir una teoría científica, el científico hace dos cosas: por un lado, identifica o, cuando es el caso, postula el dominio ontológico del fenómeno, es decir, *de qué habla* la teoría —partículas, organismos, personas...—; y, por otro lado, busca sintetizar en unos pocos enunciados —ecuaciones, en el caso de la física, por ejemplo— los procesos, mecanismos o relaciones que operan sobre los elementos del dominio y que se supone que explican las regularidades observadas. Este último elemento es lo que se conoce como *leyes científicas* o *leyes de la ciencia*.

Aunque comúnmente se suele hablar casi de manera indistinta acerca de las *leyes de la naturaleza* y de las *leyes científicas*, estrictamente hablando no son lo mismo. Como han defendido, entre otros, Michael Scriven (1961) y Nancy Cartwright (1983), las *leyes de la ciencia*, con pocas excepciones, suelen ser inexactas y muy restringidas al involucrar de manera implícita cláusulas *ceteris paribus* que hacen que dichas leyes sean legítimamente aplicables sólo en casos hipotéticos ideales. A pesar de que, en el mejor de los casos, las leyes científicas permiten hacer predicciones funcionales, estas predicciones no son más que aproximaciones a los fenómenos, puesto que las leyes que usamos para inferirlas se enuncian para casos idealizados que no corresponden exactamente con lo que sucede en la realidad. Siendo así, hay quienes defienden que no puede considerarse que las leyes de la ciencia correspondan exactamente con algo *real* que hay detrás de los fenómenos. En otras palabras, si las leyes de la ciencia son inexactas o, a lo sumo, buenas aproximaciones a la realidad, no podemos comprometernos con que éstas estén describiendo correctamente el mundo. Esto ha llevado a Cartwright, por ejemplo, a defender un antirrealismo con respecto a las leyes de la ciencia.

¹⁵ Existen posturas en filosofía de la ciencia que defienden visiones alternativas acerca de los objetivos de la ciencia; ver, por ejemplo, (Van Fraassen, 1980).

Si bien la evidencia de Cartwright y compañía puede llegar a constituir un caso sólido en contra del realismo acerca de las leyes científicas, tal argumento no apuntaría de igual manera a descartar la idea de que de hecho *existan* leyes en la naturaleza. Independientemente de si la ciencia actual ha podido formular, o no, de manera explícita leyes científicas que describan exactamente los fenómenos del mundo y frente a las cuales podamos ser realistas, lo cierto es que parece ser que las regularidades están ahí. Lo que quiero hacer notar, pues, es que si no somos realistas con respecto a las leyes postuladas por la ciencia, aún podemos creer que *hay* leyes en la naturaleza. Es decir, una cosa son los enunciados con los que los científicos pretenden explicar lo que acaece en el mundo, a saber, las leyes de la ciencia, y otra cosa la naturaleza metafísica de las regularidades que hay en el mundo, a saber, las leyes de la naturaleza. Es con respecto a esto último que quiero hablar en el presente capítulo.

El debate filosófico con respecto a las leyes de la naturaleza inicia con la discusión acerca de las características que un enunciado que pretenda corresponder a una ley de la naturaleza debería tener. Así, si la ciencia aspira a descubrir las leyes de la naturaleza, las leyes de la ciencia deberían cumplir con tales características. Aunque se han considerado diversos conjuntos¹⁶, la mayoría de los filósofos interesados en este tema suele estar de acuerdo con respecto a un conjunto básico de características que un enunciado *legal* o *tipo-ley* debería tener, a saber: ser verdadero, ser universal y ser contingente. Un primer problema consiste en definir si tales características son *condición suficiente* o *condición necesaria* para determinar la *legalidad* de un enunciado.

Empecemos por considerar la posibilidad de que el conjunto de las características mencionadas constituya una condición suficiente para que un enunciado sea legal. Algunos contraejemplos parecen mostrar que ése no es el

¹⁶ Ver, por ejemplo, (Swartz, 1985), (Carroll, 1994), (Schrenk, 2017).

caso. Para ilustrar esto, tomemos el caso de las generalizaciones accidentales.¹⁷ Considérense los siguientes dos enunciados verdaderos, universales y contingentes: “*todas las esferas de uranio tienen menos de un kilómetro de diámetro*” y “*todas las esferas de oro tienen menos de un kilómetro de diámetro*”.¹⁸ Aunque el primer enunciado podría razonablemente considerarse una ley de la naturaleza, parece claro que el segundo no lo es. Que no haya esferas de oro de más de un kilómetro de diámetro resulta ser algo accidental, es decir, que no depende de la naturaleza del oro; pues si lograra encontrarse la cantidad de oro suficiente para formar una esfera de ese tamaño, ninguna propiedad del oro impediría que se formara —lo que sí pasaría en el caso del uranio—. Así pues, parece que las tres características en cuestión no son suficientes para determinar las leyes de la naturaleza: no es suficiente con que un enunciado sea verdadero, universal y contingente para que sea una ley. En este caso, el conjunto de características es demasiado débil, pues nos obligaría a admitir como leyes algunos enunciados que no estaríamos dispuestos a aceptar como tales.

Pasemos ahora a analizar la posibilidad de que el conjunto de características en cuestión constituya una condición necesaria de los enunciados que corresponden a leyes de la naturaleza. En este caso existe también una serie de contraejemplos con los que se pretende negar dicha posibilidad:

Supongamos, por ejemplo, que el mundo fuera de la siguiente manera: todas las frutas en el jardín de Smith en cualquier momento son manzanas. Cuando uno intenta introducir una naranja dentro del jardín, ésta se convierte en un elefante. Los plátanos se convierten en manzanas al cruzar los límites de ingreso al jardín, mientras que las peras son resistidas por una fuerza que no se puede superar. Los árboles de cereza plantados en el jardín producen manzanas o no producen nada. Si todas estas cosas fueran ciertas, habría un caso muy fuerte para que fuera una ley que todas las frutas en el jardín de Smith son manzanas. (Tooley, 1987, pág. 120)

¹⁷ Aquí me limitaré al caso de las generalizaciones accidentales para ilustrar el problema acerca de que la caracterización de las leyes como enunciados verdaderos, universales y contingentes es demasiado débil. Otros tipos de contraejemplos que apuntan en esa misma dirección son los que hacen referencia a generalizaciones vacías o a conceptos problemáticos (p. ej. *verdul*). Ver (Carroll, 1994, pág. 31 y ss).

¹⁸ Este ejemplo se atribuye a Reichenbach (1947).

En este ejemplo se considera un enunciado verdadero, contingente, no-universal —es una generalización restringida—, que razonablemente estaríamos dispuestos a aceptar como ley en ese mundo hipotético que nos propone Tooley. Esto lleva a pensar que el conjunto de características que se está considerando es demasiado fuerte porque nos obligaría a descartar como leyes algunos enunciados que sería razonable aceptar como tales. Así pues, parece que las tres características en cuestión tampoco son necesarias para determinar las leyes de la naturaleza: no es necesario que un enunciado sea verdadero, universal y contingente para que sea una ley. Tooley reconoce que si bien, tal y como está planteado en la cita anterior, es posible reconstruir el ejemplo para que el enunciado que da lugar a la verdad nomológica acerca del jardín de Smith tenga forma universal, también hay formas de refinarlo para hacerlo inmune a esa posibilidad.¹⁹ Aunque estos tipos de ejemplo son claramente hipotéticos, hacen evidente la posibilidad lógica de que existan generalizaciones restringidas que expresen leyes y, por lo tanto, permiten concluir que el conjunto de características en cuestión puede llegar a ser demasiado fuerte.

Tenemos, pues, que las características de verdad, universalidad y contingencia no son en conjunto ni necesarias ni suficientes para determinar la legalidad de un enunciado. Si bien ha habido propuestas para ajustar dicho conjunto —añadiendo, quitando o limitando características—, ninguna de ellas ha resultado ser lo suficientemente fuerte como para consolidar una definición de ley de la naturaleza. Por esta razón, entre otras, las investigaciones sobre leyes de la naturaleza actualmente se enfocan en determinar el carácter metafísico de dichas leyes, en lugar de tratar identificar características de enunciados tipo ley.

Las posturas acerca del estatus metafísico de las leyes de la naturaleza se pueden clasificar en dos grandes grupos: el *necesitarista* y el *regularista*.²⁰

¹⁹ Ver (Tooley, 1987, págs. 121-122).

²⁰ La terminología “necesitarismo/regularismo” la retomo de (Swartz, 2020), si bien mi desarrollo de tal clasificación se distancia de su propuesta en ciertos aspectos.

El *necesitarismo*, dicho brevemente, considera que las leyes de la naturaleza *gobiernan* sobre el comportamiento de los objetos del mundo y, de esa manera, dan lugar a las regularidades que observamos. Este tipo de postura, como veremos, se caracteriza por recurrir a nociones modales metafísicamente fundamentales, o primitivas, para decretar la *necesidad física*²¹. El *regularismo*, por su parte, niega que en el mundo existan relaciones necesarias o propiedades modales metafísicamente fundamentales y considera que las leyes de la naturaleza no son sino resúmenes de las regularidades que acaecen en el mundo; es decir, las leyes de la naturaleza no se imponen sobre los objetos del mundo definiendo su comportamiento, sino que se limitan a describirlo. Así pues, en este tipo de postura, la noción de necesidad física se construye sin recurrir a modalidad primitiva. El *humeanismo* acerca de leyes —basado en la tesis de superveniencia humeana— es la propuesta regularista más reconocida. Como veremos, tanto del lado necesitarista, como del lado regularista, existen propuestas que pretenden adscribirse a principios naturalistas como aquellos con los que me he comprometido en la introducción a esta investigación.

2. La concepción necesitarista

Hemos considerado un conjunto de características básico que, en general, los enunciados que corresponderían a leyes de la naturaleza parecen cumplir, a

²¹ La noción de *necesidad física* se refiere a cierto tipo de necesidad que se establece dentro de un mundo a partir de las leyes naturales del mismo. La necesidad física está subordinada a la *necesidad metafísica*, es decir, si algo es metafísicamente necesario, también es físicamente necesario, pero no al contrario. Como se vio en la introducción a este trabajo, parte del reto naturalista consiste en dar cuenta de ambas nociones de necesidad sin postular propiedades modales metafísicamente fundamentales.

La noción de necesidad física no es contradictoria con la condición de contingencia mencionada anteriormente, pues lo que la condición de contingencia supone es que las leyes de la naturaleza no son *metafísicamente necesarias*. Por ejemplo, no es metafísicamente necesario que la velocidad de la luz sea de 300000 km/s, podría haber sido de 200000 km/s. Por su parte, la condición de necesidad física lo que establece es que, dadas las leyes de la naturaleza de determinado mundo, no es posible que la luz no tenga la velocidad prescrita (necesitarismo) o descrita (regularismo) por las leyes de dicho mundo.

saber, verdad, universalidad y contingencia. Pero, como se vio en la sección anterior, es claro que no todo enunciado que cumpla con esas características corresponde a una ley de la naturaleza; es el caso, por ejemplo, de las generalizaciones accidentales, como “todas las esferas de oro tienen menos de un kilómetro de diámetro”, o de las generalizaciones vacías, como “todos los unicornios son blancos”. Queremos saber, entonces, qué es lo que hace a una ley ser una ley. En otras palabras, nos preguntamos en un sentido metafísico: *¿qué son las leyes de la naturaleza?*

Para empezar a abordar esta pregunta, vale la pena notar que el término ‘ley’ ya viene cargado conceptualmente. Típicamente entendemos que una ley es una especie de mandato superior que debe ser obedecido por algo o alguien. Las leyes contenidas en la constitución de un país, por ejemplo, pretenden garantizar el orden de una sociedad; para esto, se decreta que los miembros de dicha sociedad se someterán a las leyes contenidas en ese documento o, de lo contrario, enfrentarán un castigo. Si entendiéramos a las leyes de la naturaleza en este sentido, tendríamos que decir que son algo que está por fuera de los entes que pueblan el mundo y que éstos están obligados a someterse a ellas. La cuestión es que, a diferencia de las leyes humanas, se entiende que las leyes de la naturaleza son imposibles de violar (al menos en este mundo). Si yo suelto un objeto en condiciones normales, éste, *necesariamente*, caerá. ¿En qué se fundamenta esta necesidad? ¿Cómo se da el salto de observar regularidades a asumir que éstas son el producto de relaciones de necesidad?

La anterior, como ya se ha mencionado, corresponde a una de las principales posturas con respecto a *qué es* una ley de la naturaleza. Se le conoce como la concepción *necesitarista* o, en algunos casos, concepción *gubernista* de las leyes de la naturaleza. En pocas palabras, para los defensores de la concepción gubernista, una ley de la naturaleza es aquello que rige o gobierna el comportamiento de los entes de una parcela de la realidad; es algo que está por encima o que es anterior a los entes mismos; es algo que hace necesario que los

entes se comporten como se comportan. Pero, ¿qué es ese *algo*? La respuesta a esta pregunta dependerá del tipo de necesitarista del que estemos hablando. Éstos pueden clasificarse en tres tipos: los *universalistas*, entre cuyos principales representantes se encuentran David Armstrong (1978, 1983), Fred Dretske (1977) y Michael Tooley (1977); los *primitivistas*, representados principalmente por John Carroll (1994) y Tim Maudlin (2007); y los *reduccionistas*, entre los que se puede contar a Mauro Dorato y Michael Esfeld (2015), Brian Ellis (2001, 2002) y Stephen Mumford (2004).

2.1. *Universalismo acerca de leyes*

El universalismo acerca de leyes, liderado por Armstrong, junto a Dretske y Tooley, se basa en el supuesto fundamental de que las propiedades naturales²², tales como *ser un electrón* o *estar cargado*, tienen una existencia propia que va más allá de ser el conjunto o clase de objetos individuales que se parecen en cierto aspecto. El universalista afirma, entonces, que el aspecto en el que se parecen los objetos de una clase está dado por una propiedad que existe como un ente en sí mismo *además* de los objetos que la instancian. Por ejemplo, no sólo existe la clase de las cosas cargadas, sino que existe la propiedad de *estar cargado* como algo diferente de los objetos cargados. Cuando son entendidas así, es decir, como siendo algo más que clases de cosas, las propiedades reciben el nombre de “universales”. (Schrenk, 2017, pág. 145)

La idea general del universalismo acerca de leyes consiste en decir que las leyes de la naturaleza están dadas por una *relación de necesidad entre universales*. Armstrong lo enuncia de la siguiente forma:

Supóngase que es una ley que todos los Fs son Gs. La F-idad y la G-idad son tomados como universales. Una cierta relación, una relación de necesidad no-lógica

²² Las *propiedades naturales* son propiedades independientes de la mente, la idea es que la naturaleza misma está dividida en sus propias clases de entidades. (Schrenk, 2017, pág. 139)

o contingente, se sostiene entre F-idad y G-idad. Este estado de cosas puede ser simbolizado como 'N (F, G)'. (Armstrong, 1983, pág. 85)

Si se da por sentada la existencia de una relación de necesidad entre los universales de F-idad y G-idad, se puede inferir que $\forall x(Fx \rightarrow Gx)$, esto es, que cualquier particular que instancie la propiedad F también instanciará la propiedad G. Decir que es una ley de la naturaleza que *todas las esferas de uranio tienen menos de un kilómetro de diámetro* es decir que existe una necesidad nomológica (N) —una necesidad dada por leyes de la naturaleza— entre el universal “ser una esfera de uranio” (U) y el universal “tener menos de un kilómetro de diámetro” (K). La relación de necesidad N (U, K) es un universal de segundo orden y, como universal, tiene una existencia propia independiente de los universales U y K y de los objetos que instancien las propiedades U y K, esto asegura que $\forall x(Ux \rightarrow Kx)$.

Con este enfoque, los universalistas pretenden evitar el problema que para ellos supondría derivar las leyes de la naturaleza a partir de cuantificaciones universales sobre particulares; pues es posible que un enunciado de cuantificación universal sea verdadero, pero que lo sea sólo accidentalmente. El hecho de que todo F sea G puede provenir de una casualidad, esto es, que no dependa de una característica intrínseca de la naturaleza. Que “*todas las esferas de oro tienen menos de un kilómetro de diámetro*” sea verdadero no implica que exista una relación de necesidad entre las propiedades “ser una esfera de oro” y “tener menos de un kilómetro de diámetro”. Si se infirieran leyes a partir de cuantificaciones universales verdaderas que podrían resultar accidentales, se estaría yendo en contra de una de las intuiciones más básicas acerca de las leyes de la naturaleza, a saber, que fijan relaciones de necesidad entre particulares. La idea es que a partir de $\forall x(Fx \rightarrow Gx)$ no se puede inferir N (F, G), pero de N (F, G) sí se puede inferir que $\forall x(Fx \rightarrow Gx)$.

Nótese que, en su definición, Armstrong considera a esta relación de necesidad como “una necesidad no-lógica o contingente”. Con esto quiere salvar

la intuición de que las leyes de la naturaleza bien podrían haber sido otras. Que haya una relación de necesidad entre dos universales no es algo necesario: en otro mundo posible, en el que las leyes de la naturaleza fueran distintas a las del mundo actual, tales universales podrían no estar ligados por dicha relación y esto no estaría en contra, de ninguna manera, de la concepción necesitarista —universalista— de las leyes. Es contingente que las leyes de la naturaleza sean las que son, pero, una vez fijadas, éstas imponen relaciones de necesidad entre universales que necesariamente se manifiestan en los particulares que los instancian. En este sentido, las leyes de la naturaleza son inviolables, son ellas las que determinan lo que se conoce como *necesidad física*.

Al comprometerse con la existencia de universales y relaciones de necesidad entre ellos, Armstrong da un paso que lo aleja de la posibilidad de estar defendiendo una concepción filosófica naturalista como la que describí en la introducción a este trabajo. Armstrong simpatiza fuertemente con los ideales empiristas, pero, al mismo tiempo, no concibe una forma de dar cuenta de las leyes de la naturaleza que no incluya asumir la existencia de relaciones de conexión necesaria o modalidad metafísicamente fundamental. Aún así, intenta mantenerse tan cerca como le es posible de una filosofía naturalista. Para ello, se adscribe a una concepción aristotélica —en lugar de platónica— de los universales (Schrenk, 2017, pág. 146), es decir, defiende que las propiedades existen como algo más que clases de objetos, pero que sólo existen cuando son instanciadas y no como algo anterior o independiente de los objetos que las instancian.

El principal problema del universalismo acerca de leyes consiste en que no especifica *qué es* esa relación de necesidad entre universales que está postulando, es decir, no es clara cuál es la naturaleza de N y cómo da lugar al hecho de que todo F es G ²³. Según Lewis (1983), para que $N(F, G)$ garantice la

²³ Para ampliar sobre las críticas al universalismo remitirse a (Van Fraassen, 1989), (Lewis, 1983).

ley de que todo F es G, la relación de necesidad no puede ser otra que la conjunción constante, con lo que el problema de la regularidad simplemente se está trasladando de los particulares a los universales. Ante esta pregunta, Armstrong (1993) responde que la relación N corresponde a una relación de causalidad entre *tipos* en lugar de entre *tokens*. Pero esta respuesta sigue siendo insatisfactoria, pues para un humeanista, como Lewis, apelar a causalidad no impone ningún tipo de necesidad sobre el mundo, que es lo que quieren defender los necessitaristas.

Por otro lado, si se toma en serio la respuesta de Armstrong, surgen dudas con respecto a la naturaleza de la relación de causalidad que él está invocando. No es claro si se entiende: (1) como una relación que sólo opera a nivel de universales o (2) como un tipo de relación que puede darse tanto entre universales como entre particulares y, si es así, cómo es posible que una misma relación opere metafísicamente a distintos niveles. En cualquiera de los dos casos haría falta argumentar más al respecto, pues si no se explica cómo opera dicho mecanismo sobre los objetos particulares, entonces renombrar la relación de necesidad entre universales como ‘causalidad’ no resuelve el problema y parece un movimiento *ad hoc* por parte del necessitarista.

2.2. Primitivismo acerca de leyes

El primitivismo acerca de leyes asume que las leyes de la naturaleza son ontológicamente básicas, es decir, no dependen de nada, no se reducen a nada, no se fundamentan en nada. Las leyes de la naturaleza existen en el mundo físico y operan directamente sobre los entes que lo pueblan²⁴ dando lugar a las regularidades que observamos. Para el primitivista, la pregunta acerca de la naturaleza metafísica de las leyes se responde de la siguiente forma: *las leyes de*

²⁴ La relación N de los universalistas acerca de leyes no opera directamente sobre objetos particulares, sino que opera sobre universales.

la naturaleza son leyes de la naturaleza. Así pues, a diferencia del universalismo acerca de leyes, el primitivismo no tiene que enfrentar el problema de tener que dar explicaciones extra con respecto a la metafísica postulada para dar buena cuenta de lo que son las leyes de la naturaleza.

La preocupación inmediata que surge al enfrentarse con esta propuesta es, de nuevo, si no es una solución *ad hoc* que simplemente está evitando el problema. Aunque postular un nuevo tipo de entidad —las leyes de la naturaleza— podría, efectivamente, parecer un movimiento *ad hoc*, los defensores del primitivismo acerca de leyes argumentan tener buenas razones para comprometerse con una metafísica de leyes ontológicamente primitivas.

John Carroll, en su libro de 1994, *Laws of Nature*, desarrolla un argumento a favor del primitivismo acerca de leyes que parte de un compromiso metafísico con *lo modal* y lo que él llama *conceptos nómicos* (Carroll, 1994, pág. 7). Los conceptos nómicos son conceptos que exhiben un carácter modal, es decir, que están íntimamente ligados con las nociones de *necesidad* y *posibilidad*. Conceptos como causalidad, condicional contrafáctico, disposicionalidad, leyes de la naturaleza, entre otros, son, entonces, conceptos nómicos.

Carroll considera que la investigación filosófica sobre leyes de la naturaleza con frecuencia ha estado viciada por ciertos prejuicios en contra de la modalidad. Las leyes de la naturaleza han sido miradas con sospecha por las mismas razones que las conexiones necesarias. Los empiristas se niegan a aceptar que existen conexiones necesarias, argumentando que no es posible que observemos de manera directa dicha relación: lo único que podemos observar es que hay regularidades, pero, de allí, no podemos inferir con confianza que existan relaciones de necesidad en el mundo. De la misma forma, teniendo en cuenta que las leyes de la naturaleza se han entendido típicamente como fijando relaciones de necesidad y dado que no podemos tener acceso perceptual directo a la operación de las leyes sobre los entes, entonces no debemos comprometernos con que éstas existen por encima de ellos.

Con base en consideraciones como las anteriores, los seguidores de la tradición empirista han decidido que el concepto de ley de la naturaleza, entendido como algo que entraña modalidad, resulta muy misterioso para ser aceptado dentro de nuestra metafísica como algo ontológicamente independiente. Dado esto, la idea es buscar reducir dicho concepto a otros conceptos que nos resulten mucho menos problemáticos. En otras palabras, es necesario encontrar una clase significativa de conceptos básicos a partir de los cuales definir el concepto de ley de la naturaleza.²⁵ Como la premisa empirista niega la existencia de cualquier tipo de relación necesaria metafísicamente fundamental, estaríamos buscando, entonces, conceptos básicos limpios de cualquier rastro de modalidad²⁶, pues, de otra manera, volveríamos al problema antes mencionado. Así pues, la noción de ley de la naturaleza no puede ser definida en términos de causalidad, explicación, disposiciones o contrafácticos, por ejemplo, ya que todos ellos contienen fuertes rasgos modales que no se pueden justificar dentro de los estándares empiristas.

El argumento de Carroll en contra de las pretensiones de reducir el concepto de ley a ciertos conceptos “no problemáticos” para los empiristas, consiste en intentar mostrar que no existe un conjunto tal de conceptos a través de los cuales pueda construirse una definición como la deseada. Para hacerlo, se concentra en hacer evidente que los conceptos a los que los empiristas han intentado acudir están “infectados” de *nomicidad*, por lo que en realidad no resultan adecuados para sus propósitos. En el siguiente párrafo se encuentra el núcleo de la defensa de Carroll acerca de los *conceptos con compromisos nómicos*:

Volviendo a la pregunta de qué conceptos pueden ser usados en la definición de ‘ley de la naturaleza’, consideremos otro concepto: percepción. Aunque no suele ser incluido con causación y los otros conceptos nómicos, la mayoría de los filósofos

²⁵ Como veremos más adelante, esta tradición empirista da lugar a una postura con respecto a las leyes de la naturaleza que las subordina a cuestiones de hecho locales y que corresponde a lo que se conoce como *humeanismo*.

²⁶ Recordemos la discusión sobre el reto de Quine a la que hice referencia en la introducción a este trabajo.

reconocen que también tiene un carácter no-accidental. Estos pensadores han llegado a las mismas conclusiones acerca de algunas otras nociones como acción, referencia e incluso una noción metafísica tan básica como la de persistencia (identidad a través del tiempo). El carácter modal de estos conceptos es comúnmente reconocido porque [...] hay algunas conexiones fácilmente identificadas y extremadamente verosímiles entre estos conceptos dispares y causación. Por ejemplo, con respecto a la percepción, es claro que nada percibe nada más a menos que haya una conexión causal entre el perceptor y la entidad percibida. (Carroll, 1994, pág. 8)

A partir de lo anterior, Carroll plantea su tesis de que la distinción metafísicamente relevante no es aquella entre conceptos nómicos y no-nómicos, sino entre conceptos con compromisos nómicos y sin ellos. De esta manera, lo que estaría buscando el empirista sería una definición de leyes de la naturaleza en términos libres de compromisos nómicos. El problema es que el rango de los términos sin compromisos nómicos es extremadamente reducido y con los que hay no parece posible construir una definición satisfactoria de ley.

Pensemos, por ejemplo, en los conceptos sobre objetos físicos. Carroll piensa que, aunque *prima facie* no sea obvio, incluso este tipo de conceptos involucra compromisos nómicos. Uno de los más obvios, según Carroll, tiene que ver con las propiedades disposicionales. Es claro que nada es, por ejemplo, una mesa, a menos que exhiba siquiera una propiedad disposicional, por ejemplo, la propiedad disposicional de sostener algunos objetos sobre ella. Como las propiedades disposicionales no son ejemplificadas a menos que haya por lo menos una ley de la naturaleza que diga cómo se comportan *necesariamente* los objetos con esas propiedades, entonces nada podría ser una mesa a menos que haya por lo menos una ley de la naturaleza (Carroll, 1994, pág. 8). Es decir, la existencia de los objetos físicos depende fuertemente de la existencia de leyes de la naturaleza. Si se acepta lo anterior, los conceptos libres de compromisos nómicos resultan siendo muy escasos y se limitan a conceptos formales, lógicos y matemáticos, a partir de los cuales es difícil imaginar cómo reconstruir el mundo.

Con esto, Carroll espera haber demostrado que la reducción analítica de las leyes de la naturaleza a conceptos libres de compromisos nómicos no es posible.²⁷

Ahora bien, nótese lo siguiente: Carroll afirma estar presentando un argumento en favor de la *centralidad de lo nómico*. Pero parece que el término ‘centralidad’ es lo suficientemente vago como para no sugerir una relación metafísica fuerte; es decir, nos dice que son pocos los conceptos libres de compromisos nómicos, pero no nos dice en qué consiste metafísicamente esa relación de compromiso:

Así, estas consideraciones apoyan fuertemente *la centralidad de lo nómico*. Ha quedado claro que, si no hubiera leyes de la naturaleza, entonces no habría mucho más. Si no hubiera leyes, entonces no habría causación, no habría disposiciones, no habría condicionales contrafácticos verdaderos (no triviales). Por lo mismo, si no hubiera leyes de la naturaleza, no habría percepción ni acciones ni persistencia. No habría mesas ni cosas rojas ni cosas con valor alguno, no habría siquiera objetos físicos. (Carroll, 1994, pág. 10)

Aunque a partir de la cita anterior podría pensarse que la noción de ley de la naturaleza tiene una función especial dentro del conjunto de los conceptos nómicos, esto no es el caso para Carroll. Hacia el final de su libro, el autor argumenta en favor de la independencia del concepto de *causalidad* en relación con los otros conceptos nómicos y, finalmente, defiende que dentro del conjunto de los conceptos nómicos la causalidad es un concepto *central*, es decir, que todos los demás conceptos nómicos están *comprometidos* con ella de alguna manera. “Con respecto a nuestro a nuestro aparato conceptual completo, la causación es el centro del centro” (Carroll, 1994, pág. 118).

Las leyes de la naturaleza, entonces, pueden ser irreducibles a conceptos libres de compromisos nómicos, pero no son fundamentales dentro de lo nómico. Así, en últimas, Carroll no se compromete explícitamente con la afirmación de que las leyes de la naturaleza son ontológicamente fundamentales o primitivas

²⁷ Veremos más adelante cómo utiliza Carroll este mismo argumento para refutar también la tesis de reducción ontológica conocida como *superveniencia humeana*. Allí argumentaré por qué el argumento de Carroll falla cayendo en una petición de principio.

—como parecía ser su objetivo al inicio del libro—, sino que se limita a defender su importancia metafísica cuando se trata de distinguir lo nómico de lo no-nómico. Desde mi perspectiva esto resulta, al menos, un poco decepcionante para una tesis que pretendía dar respuesta a la pregunta de *qué son las leyes de la naturaleza*.

Como yo lo veo, si el objetivo de Carroll era desvirtuar la idea de los empiristas con respecto a que los conceptos nómicos deben ser metafísicamente secundarios, se esperaría que la conclusión estuviera dirigida a dotarlos de autonomía, es decir, a tomarlos como metafísicamente fundamentales, pero, al final, el autor no es lo suficientemente explícito en ese sentido. Incluso después de poner a la causalidad en “el centro del centro”, no queda claro cómo es que ésta fundamenta metafísicamente todo lo que la rodea. De nuevo, como pasaba con la relación de necesidad entre universales que postulaban los universalistas, el problema simplemente se ha trasladado. Mientras no se dé cuenta de lo que es la causalidad, no se habrá avanzado mucho en el problema de qué son las leyes de la naturaleza. Todo el argumento de Carroll puede, a lo sumo, entenderse como una propuesta negativa, algo como: “no puedo decir mucho acerca de las leyes de la naturaleza —más allá de reconocer la importancia de sus relaciones con otros conceptos nómicos—, pero puedo afirmar que no son reducibles a conceptos libres de compromisos nómicos, dado que no hay un conjunto básico de estos últimos a partir del cual parezca factible reconstruir ontológicamente el mundo físico”.

Por su parte, Maudlin (2007) adopta un *primitivismo* acerca de leyes en todo el sentido de la palabra; para él, las leyes deben aceptarse como entidades fundamentales dentro de nuestra ontología:

Mi propia propuesta es simple: las leyes de la naturaleza deben ser aceptadas como ontológicamente primitivas. Podemos usar metáforas para encender la imaginación: entre las regularidades de evolución temporal, algunas, tales como quizás esas descritas por la ecuación de Schrödinger, gobiernan o determinan o

generan la evolución. Pero estas metáforas no son ofrecidas como un análisis. De hecho, es relativamente claro lo que se afirma cuando se dice que una relación funcional es una ley. Las leyes son patrones que la naturaleza respeta; decir lo que es físicamente posible es decir lo que los constreñimientos de esos patrones permiten. (Maudlin, 2007, pág. 15)

Según Maudlin, uno de los problemas que tienen las principales posturas acerca de la naturaleza metafísica de las leyes, como el universalismo y el regularismo²⁸, es que fallan en la tarea de salvar ciertas intuiciones que tenemos con respecto a ellas. Por un lado, el universalismo, como vimos anteriormente, no logra explicar satisfactoriamente en qué consiste la postulada relación de necesidad entre universales, por lo tanto, no ofrece ninguna ventaja en comparación con una ontología de leyes primitivas —al contrario, resulta mucho menos intuitiva—. Por el otro, la propuesta regularista más sofisticada, a saber, el humeanismo de Lewis, falla en estar de acuerdo con algunas de nuestras intuiciones acerca de las leyes de la naturaleza, pues, defiende Maudlin, su caracterización acepta como leyes cosas que no estaríamos dispuestos a aceptar como tales.

Aunque la estudiaremos a detalle dentro de poco, valga por el momento con saber lo siguiente: la propuesta de Lewis consiste en afirmar que lo que hace a una regularidad ser una ley es que aparece como un teorema en todas las teorías verdaderas acerca del mundo que tienen el mejor balance entre simplicidad e informatividad. Maudlin presenta algunos ejemplos con los que pretende mostrar que la propuesta de Lewis tomaría generalizaciones accidentales como leyes, al ser regularidades que cumplen con lo anterior. Por ejemplo, teniendo en cuenta las leyes de la naturaleza de nuestro mundo, es físicamente posible un mundo en el que todas las estrellas son miembros de un sistema binario de estrellas. Si este fuera el caso, la concepción de Lewis aceptaría este hecho como una ley. Pero la intuición nos dice que tal hecho, aunque sorprendente, sólo sería uno de los muchos resultados posibles de la operación de las leyes de la

²⁸ Esta propuesta se revisa más adelante en este capítulo.

naturaleza sobre las condiciones iniciales del universo; no hay nada intrínseco a la naturaleza de las estrellas que las haga pertenecer siempre a un sistema binario. Es decir, un mundo como el descrito es un modelo perfectamente posible de la teoría de la gravitación, pero no es el único modelo posible; de manera que dicha situación no debería considerarse una ley. Esto es claro, dice Maudlin, si entendemos cómo funciona la teoría de la gravitación, pero la propuesta de Lewis falla en capturar esta intuición.²⁹ (Maudlin, 2007, pág. 16)

Además de salvar intuiciones, Maudlin asegura que tomar a las leyes de la naturaleza como ontológicamente primitivas supone una gran ventaja a la hora de examinar nuestras creencias acerca de otras nociones importantes como las de *posibilidad*, *contrafácticos*, *explicación*, *causalidad* y *disposicionalidad*. Adelantándose a una de las críticas más obvias —la de *adhocidad*—, Maudlin argumenta que cualquier teoría metafísica tendrá que postular primitivos y que la pertinencia de los mismos debe estudiarse con base en cómo encaja todo lo demás alrededor de ellos. En este caso, defiende Maudlin, si nos dirigimos al tipo de nociones antes mencionadas y otras similares, queda justificada la elección de las leyes como base ontológica y conceptual. Maudlin intenta mostrar caso por caso cómo nuestras creencias sobre leyes permiten hacer inferencias que dan lugar de manera limpia y directa a nuestras creencias sobre posibilidad, contrafácticos, explicación, etc. También argumenta que intentar plantear la inferencia en sentido contrario o partiendo de otros conceptos como primitivos, resulta en consideraciones más intrincadas o menos intuitivas. Esto permite vislumbrar un sistema conceptual ordenado en el que encajaría toda esta clase de nociones problemáticas.

El problema con este tipo de nociones, como ya he mencionado, tiene que ver con que típicamente se entienden como algo que involucra *conexiones*

²⁹ Más adelante mostraré que este argumento de Maudlin en contra de Lewis no representa una amenaza para la concepción humeanista porque parte de una petición de principio. Ver página 54 y ss.

necesarias; un carácter modal inaceptable desde el punto de vista naturalista. Así pues, Maudlin, quien también aspira al naturalismo, señala que para expresar el contenido de las leyes de la naturaleza en su propuesta primitivista no es necesario recurrir a nociones modales, sino que se hace a través de la determinación de una clase de modelos: “Los mundos posibles consistentes con un conjunto de leyes son descritos por los modelos de una teoría que postula dichas leyes” (Maudlin, 2007, pág. 18). A partir de ahí, afirma el autor, es posible reconstruir las nociones mencionadas sin apelar a modalidad.³⁰

Aunque son claras las ventajas que supone la propuesta de Maudlin para el examen filosófico de una cantidad de nociones problemáticas, sigue quedando el sinsabor de que está postulando *algo extra* —las leyes ontológicamente primitivas— como parte del amoblado del mundo. Si es posible, según la propuesta de Maudlin, determinar clases de modelos para expresar el contenido de las leyes de la naturaleza, ¿por qué es necesario, además de dichas clases, postular a las leyes como primitivos? Veremos si las alternativas reduccionista o regularista resuelven mejor el problema que nos ocupa.

2.3. Reduccionismo acerca de leyes

Repasemos brevemente la postura gubernista discutida en las dos secciones anteriores. El gubernismo acerca de leyes afirma que dentro del amoblado del mundo existe algo que es diferente de los objetos físicos, pero que, de alguna manera, opera sobre ellos determinando la manera en la que se comportan. Dependiendo del tipo de gubernismo, ese algo puede entenderse como relaciones de necesidad entre universales o como leyes ontológicamente primitivas.

³⁰ Nótese que la propuesta de Maudlin comparte algunas de las pretensiones del proyecto metafísico de Lewis mencionadas en la introducción a este trabajo, a saber, a partir de una base metafísica libre de modalidad pretende reconstruir nociones problemáticas como las de causalidad, necesidad, contrafácticos, etc.

Ahora bien, una forma intuitiva de describir el mundo es como un arreglo de objetos que instancian propiedades físicas. Usualmente entendemos que el comportamiento de los objetos depende en gran medida de sus propiedades. Por ejemplo, entre mayor sea la masa de un objeto, menor será la aceleración que adquiera bajo la acción de una fuerza de igual magnitud. Si nos apegamos a la concepción gobernista, asumiremos que esa relación particular entre masa, fuerza y aceleración es la que está siendo impuesta desde afuera por una ley de la naturaleza. Así pues, según el gobernista, bien podría haber sido el caso que la ley fuera otra y que, en lugar de ser menor, la aceleración fuera mayor cuanto mayor fuera la masa de un objeto. La aceptación o rechazo de esta afirmación dependerá de cómo se conciban las propiedades físicas.

Si estamos de acuerdo con la idea de que una propiedad juega un papel esencial en el comportamiento de un objeto y, además, que el comportamiento del mismo podría ser distinto en un mundo en el que las leyes fueran distintas, entonces, o el objeto no tiene las mismas propiedades en ambos mundos o el papel que juegan las propiedades depende metafísicamente de las leyes.

En el primer caso, la tesis del gobernista quedaría desvirtuada, pues parte de lo que quiere defender esta postura es que dos mundos posibles pueden ser exactamente iguales en todas sus características físicas —no-nómicas— y, al mismo tiempo, ser regidos por leyes de la naturaleza distintas. Así que esta posibilidad queda eliminada, si se quiere seguir siendo gobernista.

En el segundo caso —que las propiedades dependen metafísicamente de las leyes—, probablemente el gobernista tipo primitivista no tendría ningún reparo en aceptar que las leyes sustentan metafísicamente el papel de las propiedades físicas. Así pues, la propiedad de masa puede existir, siendo *la misma*, en dos mundos posibles con leyes mecánicas distintas. Que esta propiedad no lleve a que los objetos que la instancian se comporten de la misma forma en ambos mundos depende de las leyes de la naturaleza de cada mundo y no de la identidad de la propiedad. El problema consiste en cómo saber que un

objeto y su contraparte en otro mundo posible están instanciando las mismas propiedades, si se comportan distinto. Parece que para poder asegurarlo habría que considerar algún tipo de *quidditas* que definiera la identidad de una propiedad³¹:

Intentar referirse a propiedades con papeles causales diferentes a los que de hecho tienen invocaría el principio totalmente inaceptable de quiditismo: que las propiedades tienen una esencia individual, una *quidditas*, más allá de su papel causal. Sólo con una *quidditas* tal podríamos decir que ésta era la misma propiedad que, en otro mundo, tenía un papel causal diferente porque había leyes diferentes. (Mumford, 2005, págs. 207-208)

Este posible movimiento de considerar la existencia de *quidditas* para las propiedades no sólo resultaría *ad hoc*, sino que parece añadirle más “misterio” al misterio de las leyes de la naturaleza al postular la existencia de “esencias”. Por lo tanto, no sería una opción adecuada, si queremos mantener el compromiso naturalista. La opción que parece quedar abierta para el primitivista es aceptar un eliminativismo de propiedades: quizá las leyes, en últimas, sólo operan sobre puntos espacio-temporales y todo lo que observamos como propiedades es una apariencia resultante de la acción de las leyes de la naturaleza sobre esos puntos. Ésta es una alternativa que habría que estudiar con calma en otro momento, pero que, en principio, supondría una postura altamente revisionista de la metafísica, lo que me lleva a rechazarla por el momento.

Así, regresamos a la primera posibilidad: dos mundos posibles con leyes distintas deben tener propiedades distintas. Si asumimos que una propiedad implica una disposición del objeto que la posee para comportarse de cierta manera, no es posible imaginar un mundo en el que un objeto tenga exactamente las mismas propiedades y se comporte diferente bajo las mismas condiciones. En vista de esto se plantea la posibilidad de reducir las leyes de la naturaleza a propiedades físicas.

³¹ Sobre la imposibilidad de concebir una misma propiedad con poderes causales distintos ver: (Shoemaker, 1982), (Black, 2000).

Uno de los defensores de este tipo de postura es Brian Ellis (2001), (2002). Su *esencialismo* acerca de leyes consiste en afirmar que las leyes son descripciones de las propiedades esenciales de las clases naturales. La necesidad de las leyes de la naturaleza se explica porque éstas se refieren a propiedades esenciales. A diferencia de la necesidad contingente que exhiben las leyes de la naturaleza de los gobernistas, el esencialismo implica una necesidad fuerte, una necesidad *de re*. Al depender de propiedades esenciales, no es posible concebir dos mundos exactamente iguales en todo, menos en sus leyes naturales. El gobernista puede responder a esto diciendo que, precisamente, dicha necesidad fuerte va en contra de la intuición que tenemos de que el mundo podría haber tenido leyes distintas. Pero el esencialismo no tiene ningún problema para dar cuenta de esa intuición: efectivamente, el mundo habría podido tener leyes distintas, ¡si hubiera tenido propiedades esenciales distintas!

Una postura similar es la que se conoce como *disposicionalismo* acerca de leyes, defendida por autores como Alexander Bird (2007), Mauro Dorato y Michael Esfeld (2015). La principal diferencia entre las dos posturas es que en la anterior se habla de esencias que determinan disposiciones y poderes causales, mientras que en ésta se habla directamente de disposiciones. Dejando de lado esta diferencia, ambas propuestas buscan reducir las leyes de la naturaleza a hechos sobre propiedades:

De acuerdo al disposicionalismo, es en virtud de tener una masa m que las partículas ejercen una fuerza de atracción F entre sí como se describe en la ley de gravitación. [...] La masa es una disposición que se manifiesta en la atracción mutua de objetos masivos. [...] La ley revela y describe lo que los objetos hacen en virtud de poseer una masa y, crucialmente, en la mecánica de Newton esta propiedad depende para su manifestación (a saber, la aceleración) de la existencia de una fuerza. Como en la teoría de Einstein la noción de fuerza es desechada, no podemos considerar que la noción de masa en las dos teorías es la misma, dado que en el último caso la manifestación depende de la curvatura del espacio-tiempo: por lo tanto, leyes diferentes implican propiedades diferentes y las leyes supervienen a la propiedad disposicional de la masa. (Dorato & Esfeld, 2015, págs. 6-7)

Mumford (2005) toma este tipo de propuesta como punto de partida para defender lo que él llama un *realismo sin leyes*. Su idea es que, si este tipo de

propuesta es lo suficientemente sólido, el paso obligado a seguir es eliminar a las leyes de la naturaleza de nuestra ontología. Su propuesta es realista porque acepta un realismo de propiedades, pero considera que la manera en la que se argumenta que las leyes de la naturaleza dependen metafísicamente de las propiedades hace redundante incluir también a estas últimas dentro del amoblado del mundo.

Ahora bien, recordemos que una de las principales motivaciones para buscar una alternativa a las posturas gubernistas acerca de las leyes de la naturaleza consiste en la impertinencia —desde el punto de vista naturalista— de aceptar hechos modales dentro de nuestra ontología fundamental. En el caso de las propuestas que acabamos de ver, ninguna logra, todavía, sobreponerse al problema mencionado. Por un lado, ni el esencialismo ni el disposicionalismo están cumpliendo con la condición que nos interesa, pues ambos están reduciendo las leyes de la naturaleza a propiedades que exhiben fuertes características modales. Por su parte, el eliminativismo de Mumford, si bien elimina las leyes de la naturaleza, sigue manteniendo propiedades modalmente cargadas dentro de la ontología fundamental. De manera que nuestra aspiración naturalista sigue sin estar satisfecha.

3. La concepción regularista

Recapitulemos rápidamente. Desde cierto punto de vista, las leyes de la naturaleza parecen operar sobre los objetos del mundo *gobernando* o *dirigiendo* cómo se relacionan éstos entre sí y cómo evolucionan en el tiempo. Esta perspectiva apunta hacia una concepción de las leyes de la naturaleza como algo que está por encima de los objetos y que se impone a ellos —concepción gubernista—. Por otra parte, las leyes de la naturaleza parecen compartir características conceptuales importantes con nociones típicamente teñidas de modalidad como causalidad, posibilidad y disposicionalidad. El problema con este tipo de nociones —como vimos en la introducción a esta investigación— es

que hay serias razones para dudar de que las propiedades modales sean propiedades de objetos.

Una de las principales críticas en contra de las concepciones gobernistas acerca de las leyes de la naturaleza consiste en señalar que son un rezago de una concepción teísta en la que un ser superior, ajeno al mundo, impone las leyes bajo las que éste se rige. Los detractores del gobernismo alegan que las relaciones de necesidad entre universales o las leyes como entidades primitivas son sólo un sustituto para un dios legislador. El objetivo, entonces, debe ser encontrar una forma de dar cuenta de las leyes de la naturaleza sin recurrir a nociones misteriosas que apelen a modalidad ni postular entidades extra a las que no se puede acceder empíricamente. Se busca, siguiendo un compromiso naturalista, reducir las leyes de la naturaleza a una base conceptual y metafísica accesible.

Enraizada en los preceptos de la tradición empirista, la idea de que lo real debe tener una conexión con lo observable sugiere una vía de análisis filosófico para las leyes de la naturaleza. Si las leyes de la naturaleza existen, debe haber una forma de conectarlas con aquello a lo que sí tenemos acceso epistémico; debemos poder encontrar una manera de reducirlas a una base metafísica y conceptual libre de compromisos nómicos. La propuesta más influyente en este sentido se basa, como veremos a continuación, en la *tesis de superveniencia humeana* de David Lewis.

3.1. *La tesis de superveniencia humeana*

Como ya he mencionado en la introducción a este trabajo, Lewis fue un filósofo de aspiraciones naturalistas. Dado esto, el supuesto principal que le sirve como base para proponer la tesis de superveniencia humeana radica en la tesis fisicalista. Lewis comparte con los defensores de esta tesis la idea de que en el mundo no hay absolutamente nada más que hechos físicos y lo que sucede en virtud de ellos; de manera que, al encontrarse con los conceptos nómicos, tan

aparentemente misteriosos, sólo hay dos maneras disponibles de concebirlos metafísicamente: o son reales y es posible reducirlos a hechos físicos o no lo son y debemos descartarlos de nuestra ontología. Entendiendo el importantísimo papel que juegan los conceptos nómicos en nuestra concepción del mundo, Lewis asume la tarea de dar cuenta de ellos sin tener que abandonar la tesis fisicalista.

Lo primero es definir cómo se concibe ese mundo físico que ha de servir como base metafísica para todo lo demás. Para Lewis, el mundo se identifica con un *mosaico humeano* de cuestiones de hecho particular locales; es decir, el mundo consiste básicamente en un arreglo de puntos en el espacio-tiempo, en los que se instancian propiedades intrínsecas de manera independiente de lo que suceda en cualquier otro punto del espacio-tiempo. A partir de estas cuestiones de hecho localizadas es que surge todo lo demás en el mundo. Todo lo que es real puede rastrearse, en última instancia, hasta dichas cuestiones locales.

[...] Tenemos la geometría: un sistema de relaciones externas de distancia espacio-temporal entre puntos. Quizá puntos del espacio-tiempo mismo, quizá bits de materia o campos de éter de tamaño puntual, quizá ambos. Y en esos puntos tenemos cualidades locales: propiedades intrínsecas perfectamente naturales que no necesitan nada más grande que un punto en el cual ser instanciadas. En resumen: tenemos un arreglo de cualidades. Y eso es todo. Todo lo demás superviene a eso. (Lewis, 1986b, pág. x)

Las “propiedades perfectamente naturales” son, según Lewis, aquellas que dividen el mundo en su estructura misma. “Compartirlas es una cuestión de similitud cualitativa, dividen el mundo justo en sus articulaciones, son intrínsecas, son altamente específicas [...]” (Lewis, 2015 [1986a], pág. 190). El papel de la física consiste, para Lewis, en proveer un inventario de tales propiedades. Como ejemplo de las mismas, menciona propiedades físicas fundamentales como la masa y la carga eléctrica. Según la tesis de superveniencia humeana, todas las demás propiedades y verdades contingentes se sostienen en virtud de la instanciación de este tipo de propiedades y del patrón que forman los puntos que las instancian en el espacio-tiempo —en algunos casos, del patrón completo del mosaico humeano—. Así pues, si dos mundos son

exactamente iguales con respecto a sus cuestiones de hecho particular locales, entonces son iguales con respecto a todo lo demás.

Como dije, Lewis pone algunos ejemplos de lo que para él podrían ser algunas propiedades intrínsecas perfectamente naturales, pero reconoce que puede ser el caso de que ninguna de ellas lo sea —es a la ciencia a la que le corresponde definir esta cuestión— o que en otros mundos posibles se instancien propiedades muy distintas a las que se instancian en nuestro mundo, tales que ni siquiera nos las alcanzamos a imaginar.

En otros mundos donde la física es distinta, habrá ejemplares de diferentes propiedades físicas fundamentales completamente ajenas a este mundo. [...] Y en mundos no fisicalistas la distribución de propiedades físicas fundamentales no dará una caracterización cualitativa completa de las cosas, porque algunas de las propiedades “fundamentales” de las cosas no serán físicas en ningún sentido. (Lewis, 2015 [1986a], pág. 190)

En este punto es necesario aclarar que, a pesar de su estrecha relación, el fisicalismo y la superveniencia humeana son doctrinas independientes. Por un lado, la superveniencia humeana no supone el fisicalismo porque, tal y como está definida, la tesis de superveniencia humeana es compatible con que haya propiedades puntuales que no son físicas. Por el otro lado, el fisicalismo no supone superveniencia humeana porque nada garantiza que todas las propiedades físicas sean propiedades locales —de hecho, como veremos, la mecánica cuántica va a plantearle un problema en este sentido a la superveniencia humeana—. (Loewer, 2004, pág. 179)

Una vez está clara la base metafísica, el siguiente paso consiste en dar cuenta explícita de los conceptos especiales que se pretende salvar a partir ella. En particular, en este caso nos interesa la concepción de leyes de la naturaleza. Para esto, Lewis parte de la posibilidad de plantear sistemas axiomáticos que describan la totalidad de un mundo determinado. Inspirado en las ideas de John Stuart Mill (1947 [1843]) y Frank Ramsey (1978 [1928]), Lewis hace la siguiente propuesta:

Tome todos los sistemas deductivos cuyos teoremas son verdaderos. Algunos son más simples, mejor sistematizados que otros. Algunos son más fuertes, más informativos que otros. Estas virtudes compiten: un sistema poco informativo puede ser muy simple, un compendio no sistematizado de información miscelánea puede ser muy informativo. El mejor sistema es aquel que logra el mejor balance que la verdad permitirá entre simplicidad y fuerza. Qué tan bueno es un balance dependerá de qué tan amable es la naturaleza. Una regularidad es una ley si y sólo si es un teorema del mejor sistema. (Lewis, 1994, pág. 478)

Así pues, las leyes de la naturaleza de nuestro mundo (o de cualquier mundo posible) supervienen a la totalidad del arreglo de cuestiones de hecho particular locales que lo componen —el mosaico humeano—. Dicha totalidad estará especialmente bien resumida en un sistema axiomático —el que presenta el mejor balance entre simplicidad y fuerza— a partir del cual se derivan las leyes como teoremas. Por esta razón, a esta concepción regularista de leyes de la naturaleza también se le conoce con frecuencia como la *concepción de sistemas*.

3.2. Consideraciones filosóficas en contra de la superveniencia humeana

La crítica inmediata que surge contra la concepción de sistemas de Lewis es que los conceptos de *simplicidad*, *fuerza* y *mejor balance* en los que descansa, no sólo son vagos, sino subjetivos en muchos casos. ¿Cómo aceptar que las leyes de la naturaleza finalmente dependan de un criterio subjetivo? Carroll (1994, pág. 49 y ss), por ejemplo, hace notar que dichos conceptos no se pueden evaluar de manera aislada, sino que más bien se evalúan en función de relaciones triádicas como: X es más simple que Y para S. Cuando evaluamos simplicidad, lo hacemos en el marco de un contexto o conocimiento de fondo, por ejemplo, para un matemático es más simple resolver una ecuación que escribir un soneto. En cuanto a la fuerza, dependiendo del contexto hay cierta información que es más relevante que otra, por lo que quizá no sea suficiente con evaluar la cantidad de información. Igualmente, el mejor balance entre simplicidad y fuerza se evalúa con respecto a los objetivos que tengan quienes van a hacer uso del sistema en cuestión.

Dadas las inquietudes mencionadas en el párrafo anterior, Carroll evalúa uno de los primeros intentos de Lewis (1986b) por resolver dicho problema. En dicho intento de respuesta, la idea de Lewis era restringir su formulación para que simplicidad, fuerza y mejor balance se analicen conforme a nuestros estándares actuales y presentes. De esta manera, el criterio no cambia si nuestra psicología cambia o si estamos en otro mundo posible, porque los estándares relevantes son los del mundo actual. Esta propuesta parece a todas luces *ad hoc*, pues no está claro por qué nosotros, y no otra cultura en otro tiempo o mundo posible, tendríamos que ser los poseedores de los estándares adecuados para el análisis de legalidad. De cualquier manera, afirma Carroll (1994, pág. 54), incluso aunque se aceptara este movimiento, los intereses que fijan los estándares para el “mejor balance” tendrían que ser especificados explícitamente y lo más seguro es que tendrían que ver con la empresa científica. Dado que la ciencia usa un discurso que contiene causas, explicaciones, posibilidades, etc. terminaríamos cayendo de nuevo en la centralidad de lo nómico³², es decir: si la determinación del criterio que fija qué son las leyes de la naturaleza depende de un discurso que usa centralmente conceptos nómicos, entonces esa definición particular de leyes de la naturaleza no está libre de nomicidad, por lo que el objetivo naturalista de Lewis quedaría truncado.

Aunque las críticas de Carroll estén justificadas hasta cierto punto, no puede decirse que para Lewis sean definitivas. De hecho, después de la respuesta aparentemente desacertada que acabamos de ver, la solución que finalmente da Lewis con respecto a su criterio del mejor balance resulta ser mucho más sencilla: si en un mundo hay regularidades que valga la pena llamar leyes, los mejores sistemas que lo describan lo serán de una manera tan obvia, tan robusta, que no habrá duda de que son los mejores. El problema surge cuando hay sistemas en competencia y no es obvio cuáles presentan el mejor balance. En esos casos,

³² Como se describió en la sección 2.2 del presente capítulo.

piensa Lewis, seguramente el mundo que intentan describir es caótico, irregular, y justo en ese tipo de mundos no debería esperarse que haya leyes. (Lewis, 1994)

La crítica a la concepción de leyes de la naturaleza de Lewis que acabamos de revisar corresponde a un aspecto epistemológico de la propuesta. Lo que en últimas preocupa a sus detractores, en este caso, es si el criterio planteado nos permite a los seres humanos descubrir las leyes de la naturaleza o no. Si cada científico, o comunidad científica, pudiera decidir con base en sus criterios cuál sistema le parece que tiene el mejor balance entre simplicidad y fuerza, entonces no habría forma de decidir cuáles son las leyes de la naturaleza. Pero me parece que ésa es una preocupación que no pertenece aquí, ya que por la misma definición de lo que son las leyes de la naturaleza en la propuesta de Lewis—independientemente de si los criterios de simplicidad, fuerza y mejor balance estuvieran explícitamente definidos—, sería imposible para los seres humanos conocerlas. Las leyes supervienen a la *totalidad* del mosaico humeano, que contiene el estado de cosas del mundo en todo lugar y momento —pasado, presente y futuro—, algo que claramente es inaccesible para nosotros.³³

Ahora bien, el problema de la determinación del criterio del mejor balance no es el único problema que encuentran los detractores de la propuesta de Lewis. Para muchos, los problemas más graves surgen cuando, a partir de esta propuesta, se pretende fijar el estatus metafísico de algunas regularidades como leyes de la naturaleza. Dado que lo que me interesa en este trabajo es, precisamente, encontrar una concepción metafísica de las leyes naturales, a continuación, abordo las principales objeciones que, en ese sentido, se plantean en contra de la concepción de regularista y la tesis de superveniencia humeana.

Con respecto a la tesis de superveniencia humeana, Carroll pretende mostrar que no es posible reducir las leyes de la naturaleza a cuestiones de hecho particular locales o, en su vocabulario, que no se puede analizar un término

³³ Nótese la relación que hay entre esta idea y el problema de la inducción.

nómico en términos libres de compromisos nómicos. Para esto, Carroll plantea una serie de ejemplos con los que intenta mostrar que dos mundos posibles pueden compartir todas sus características libres de compromisos nómicos y, aún así, estar en desacuerdo con respecto a sus leyes. El siguiente es un experimento mental del tipo de los que plantea Carroll:³⁴

Considere dos mundos u y v como sigue. Tanto u como v contienen partículas x y y , y las leyes del movimiento de Newton se cumplen en ambos. La diferencia es que en u es ley que cuando partículas x y y interactúan, intercambian el valor de alguna propiedad —digamos el espín—, mientras que en v es ley que no intercambian espines. Las condiciones iniciales de u y v hacen que haya muchas de estas interacciones. Estos mundos difieren en sus hechos humeanos, entonces no hay, hasta ahora, problema para la superveniencia humeana. Pero relativo a cada mundo es posible —esto es, compatible con sus leyes— que hubiera habido condiciones iniciales [idénticas] tales que, si hubieran ocurrido, no habría interacciones entre partículas x y y . En tales mundos [relativos, u^* y v^*], ¿se sostiene la ley de u o la ley de v con respecto a las partículas x y y ? (Loewer, 2004, pág. 192)

La respuesta de Carroll es que es intuitivamente obvio que en el mundo u^* se sigue cumpliendo la ley de u , mientras que en el mundo v^* se sigue cumpliendo la ley de v . Y dado que estos dos mundos están de acuerdo en todas sus características humeanas, pero tienen leyes naturales distintas, entonces las leyes fallan en supervenir al mosaico humeano.

Barry Loewer (2004), defensor del humeanismo, responde a este argumento señalando que las intuiciones que inspiran este tipo de ejemplos son sospechosas porque involucran situaciones extremadamente diferentes del mundo actual y, al menos en principio, no está claro que sean correctas. Existen casos muy claros que indican que nuestras intuiciones con respecto a las leyes de la naturaleza son fácilmente falibles, por ejemplo, la intuición errónea de que un cuerpo en caída libre cae más rápido entre más pesado sea. Estas consideraciones, piensa Loewer, son suficientes para que el tipo de ejemplos que plantea Carroll no se tome en serio en contra de la superveniencia humeana.

³⁴ El pretendido contraejemplo de Maudlin en contra de Lewis que mencioné en las páginas 41-42 es también de este tipo y falla por las mismas razones por las que falla éste.

En este caso, me parece que la defensa de Lower se queda corta al concederles a los críticos de Lewis que lo que puede estar fallando son sus intuiciones, cuando lo que realmente está pasando es que el argumento cae en una falacia de petición de principio. Cuando Carroll imagina los mundos u^* y v^* asume que en estos mundos existen las leyes de u y v a pesar de que no se manifiestan. Es cierto que en dichos mundos tales leyes no supervendrían al mosaico humeano, pero esto no es una amenaza para la superveniencia humeana porque, para empezar, no hay ningún motivo para pensar que tales leyes de hecho existan en esos mundos. Si viviéramos en un mundo así, ¿qué nos llevaría a considerar la existencia de unas leyes que no se manifiestan? En este caso, la ley de u sería una generalización vacía en el mundo u^* y la ley de v sería una generalización vacía en el mundo v^* . Como mencioné al comienzo de este capítulo, considerar las generalizaciones vacías como leyes de la naturaleza resulta problemático cuando intentamos desarrollar una noción de ley; de hecho, el mismo Carroll argumenta en contra de aceptar las generalizaciones vacías como leyes (Carroll, 1994, pág. 31 y ss.). Así pues, el análisis que hace Carroll en sus experimentos mentales sólo tiene sentido si se asume previamente un necesitarismo acerca de leyes y eso, claramente, no puede contar como contraejemplo frente a una postura alternativa. Es más, el hecho de que la tesis de superveniencia humeana no dé lugar a la existencia de leyes que no se manifiestan debería considerarse una ventaja y no una desventaja de dicha propuesta, pues, como sabemos, la parsimonia constituye un principio metodológico fundamental en la investigación metafísica.

3.3. Consideraciones científicas en contra de la superveniencia humeana

Recordemos que Lewis pretende desarrollar una metafísica que esté de acuerdo con los métodos y resultados de la ciencia. Si su propuesta logra efectivamente este objetivo es algo que debe analizarse recurriendo directamente

a las teorías y resultados científicos. Esto es lo que se propone Tim Maudlin (2007, pág. 50 y ss) en su crítica al humeanismo. Maudlin inicia su análisis de la tesis de superveniencia humeana de Lewis señalando que ésta comprende dos “doctrinas” que son lógicamente independientes, a las cuales se refiere como doctrina de *separabilidad* y doctrina de *estatismo físico*. La doctrina de *separabilidad*, según Maudlin,

[...] afirma que todas las propiedades fundamentales son propiedades locales y que las relaciones espaciotemporales son las únicas relaciones físicas externas fundamentales. Para ser precisos: [la doctrina de separabilidad afirma que] el estado físico completo del mundo está determinado por (superviene a) el estado físico intrínseco de cada punto espacio-tiempo (o cada objeto puntual) y las relaciones espaciotemporales entre esos puntos. (Maudlin, 2007, pág. 51)

Por su parte, la doctrina de *estatismo físico* afirma que “todos los hechos acerca de un mundo, incluyendo los hechos modales y nomológicos, son determinados por su estado físico total” (Maudlin, 2007, pág. 51). Así pues, aplicando estas dos doctrinas a las leyes de la naturaleza, resulta que éstas supervienen al estado físico total del mundo, que, a su vez, superviene a los hechos locales y las relaciones espaciotemporales entre ellos —justo lo que dice la tesis de superveniencia humeana—.

Nótese que ninguna de las dos doctrinas que menciona Maudlin corresponde al *fisicalismo*. Como vimos antes, el *fisicalismo* se distingue de la doctrina de *separabilidad* en que no exige que las propiedades físicas fundamentales sean propiedades locales. Por otra parte, el *fisicalismo* se distingue de la doctrina de *estatismo físico* en que el fisicalismo no exige que todo lo que acaece en el mundo esté determinado por su estado físico total. El fisicalismo sólo sostiene que dos mundos que estén de acuerdo en todo lo que una física perfecta pueda decir de ellos son dos mundos que son iguales en todos los aspectos. La tesis fisicalista no asume que hechos modales y nomológicos necesariamente supervienen al estado físico total del mundo. Una propiedad física y una ley física son igualmente físicas en algún sentido para el fisicalista. Así, uno puede ser fisicalista sin ser

reduccionista respecto a las leyes de la naturaleza y otros hechos modales.³⁵ Por ejemplo, un fisicalista no reduccionista podría aceptar que dos mundos que están de acuerdo en su estado físico total y en sus leyes físicas están de acuerdo en todo lo demás. Por su parte, el estatismo físico no admite que haya nada por fuera del estado físico total del mundo, es decir, las leyes de la naturaleza y todos los demás hechos físicos y modales están determinados por dicho estado.

Siguiendo con el análisis de las doctrinas involucradas en el humeanismo, Maudlin hace notar que, dado que las cuestiones modales y nomológicas supervienen al estado físico total del mundo, entonces este último no puede requerir de las primeras para ser especificado —pues se estaría cayendo en una circularidad— (esto se establece con la doctrina de estatismo físico). Por su parte, dado que el estado físico total del mundo superviene a cuestiones de hecho particular locales y relaciones espaciotemporales entre ellas, entonces estas cuestiones y relaciones no pueden requerir ni del estado físico total del mundo ni de cuestiones modales o nomológicas para ser especificadas (esto se establece con la doctrina de separabilidad). Si se sostienen estas dos doctrinas, resulta, entonces, que las propiedades físicas fundamentales tienen que poder ser especificadas sin recurrir a las leyes de la naturaleza. Pero, según Maudlin, normalmente pensamos que las leyes de la naturaleza determinan las propiedades físicas. Esto resulta, según él, si no en un golpe al humeanismo, por lo menos sí en una idea controvertida. Maudlin no se extiende más en este punto, pero podemos notar como en él se encuentra la esencia de toda la discordancia entre una noción de leyes como supervenientes y una noción de leyes como ontológicamente primitivas. Pensar que las propiedades físicas fundamentales dependen metafísicamente de las leyes de la naturaleza supone, de algún modo, que las leyes son anteriores a las propiedades. Por otra parte, pensar que las

³⁵ Entre las concepciones no reduccionistas de las leyes de la naturaleza se destaca el primitivismo. Concepciones primitivistas son aquellas que consideran a las leyes como ontológicamente primitivas, de manera que no puede decirse que se reducen o supervienen a una ontología más fundamental. Es el tipo de propuesta que, como vimos, defiende Maudlin.

leyes de la naturaleza dependen metafísicamente de las propiedades físicas fundamentales supone, de algún modo, que las propiedades son anteriores a las leyes. Así pues, el señalamiento que hace Maudlin puede entenderse, también, como apoyándose en una petición de principio y, por lo tanto, tampoco sería una forma correcta de atacar la tesis de superveniencia humeana.

Ahora bien, una vez identificadas las dos doctrinas constituyentes de la tesis de superveniencia humeana, una vía para buscar criticar el humeanismo puede ser comprobar si alguna de ellas falla, desequilibrando, así, toda la propuesta. Como hemos visto, la doctrina de separabilidad exige que las propiedades físicas fundamentales sean locales; teniendo esto en cuenta, Maudlin presenta un argumento desde la mecánica cuántica para hacer ver que la física, de hecho, considera propiedades físicas fundamentales no-locales.

Haciendo una presentación detallada y lo suficientemente técnica de algunas cuestiones formales y experimentalmente comprobadas de la mecánica cuántica, Maudlin explica cómo los estados físicos de *sistemas cuánticos enredados*³⁶ no pueden reducirse a los estados intrínsecos de cada uno de sus componentes. Según el formalismo cuántico, no es posible determinar de manera aislada —sin hacer referencia a todo el sistema— el estado cuántico particular de cada uno de los componentes de un sistema enredado. Es más, tal y como los define la teoría, los componentes de un sistema enredado *no tienen* estados cuánticos particulares; su estado sólo puede entenderse en función del estado cuántico del sistema total. Así, la doctrina de separabilidad parece quedar desvirtuada por nuestra mejor ciencia actual.

Una forma de responder a este señalamiento es hacer notar que la doctrina de separabilidad sostiene que el estado total de un sistema enredado no se reduce directamente, sino que superviene a las propiedades intrínsecas de sus

³⁶ Remitirse al capítulo II del presente trabajo, dedicado a los fundamentos de la mecánica cuántica, para una explicación sobre el formalismo de la teoría y las implicaciones de los estados enredados.

componentes y las relaciones espaciotemporales entre ellos. Lamentablemente para el humanismo, esta aproximación tampoco funciona. Se tiene evidencia de estados enredados, como los llamados *estado singlet* y *estado $m=0$ triplet*, en los que los componentes de uno y otro sistema están exactamente en el mismo “estado” y sostienen las mismas relaciones espaciotemporales, pero existe la posibilidad de hacer mediciones sobre los sistemas completos en las que se obtienen resultados diferentes para cada uno (Maudlin, 2007, pág. 58). Es decir, dos sistemas, uno en el estado *singlet* y otro en el estado *$m=0$ triplet*, se pueden diferenciar al hacer una medición global sobre ellos, pero no se pueden diferenciar si se hacen mediciones locales sobre sus componentes. Ahora bien, la relación metafísica de superveniencia exige que, si todos los componentes y sus relaciones espaciotemporales son iguales, el estado superveniente tiene que ser igual; pero los dos tipos de estado cuántico que acabamos de ver violan esa condición, por lo que la doctrina de separabilidad sigue estando desvirtuada por la mecánica cuántica. Si se descarta la doctrina de separabilidad, la tesis de superveniencia humeana, tal y como la planteó Lewis, parece que quedaría refutada.

Si descartamos la doctrina de separabilidad, aún quedamos con la doctrina del estatismo físico, que es la que habla directamente de la superveniencia de las leyes de la naturaleza al estado físico total del mundo. Bien puede ser que el estado físico total del mundo no supervenga a hechos particulares locales y sus relaciones espaciotemporales —que era lo que sostenía la doctrina de separabilidad—, pero que se siga considerando que las cuestiones modales sí supervienen al estado físico total no-separable del mundo. Es decir, las leyes de la naturaleza seguirían siendo supervenientes y no ontológicamente primitivas (o alguna otra opción aún por considerar).

Para analizar la viabilidad de esta segunda doctrina desde una perspectiva naturalista, Maudlin se dispone a determinar si en la práctica científica hay algo que inspire la idea de que el estado físico total de un mundo

sirve como base de superveniencia para sus características modales. Lo que encontramos, según él, es que al referirse a nociones como explicación, probabilidad, posibilidad, causalidad o contrafácticos los científicos toman como referencia el estado físico del mundo en conjunción con las leyes de la naturaleza para dar cuenta de las mismas (lo cual, coincidentalmente, está en perfecta línea con la concepción primitivista de las leyes de la naturaleza de Maudlin). Por ejemplo, la noción de posibilidad física se fija en función de los estados físicos que las leyes de la naturaleza que operan en un mundo determinado permiten; en otras palabras, los estados físicos que puede tener un mundo se fijan en función de los modelos que se ajustan al conjunto de leyes que operan en ese mundo. En muchos casos, por poner otro ejemplo, las probabilidades de ocurrencia de un evento son fijadas por una ley de la naturaleza a partir de un estado físico inicial; como en el caso de la mecánica cuántica, en el que la ley de Schrödinger especifica cómo evoluciona la función de onda y, a partir de ésta, se fijan las probabilidades de observar cierto evento en una medición³⁷. De maneras similares a éstas, afirma Maudlin, la ciencia va dando cuenta de todo tipo de cuestiones modales.

Podría decirse, entonces, que los científicos reducen los conceptos nómicos en función de lo que para ellos es más básico, a saber, el estado físico y las leyes de la naturaleza. Pero esto no es suficiente para la doctrina del estatismo físico. Esta doctrina exige que todas las características nómicas, incluidas las leyes de la naturaleza, supervengan exclusivamente al estado físico total del mundo. Sin embargo, según Maudlin, en la práctica científica no se encuentran rastros de los físicos tratando de hacer una reducción de las leyes de la naturaleza en función exclusiva del estado físico total del mundo. Los científicos postulan las leyes y si éstas sirven a sus propósitos, las utilizan para hacer predicciones y dar cuenta de algunos asuntos modales, pero no parecen preocupados por reducirlas

³⁷ Remitirse al capítulo II del presente trabajo, dedicado a los fundamentos de la mecánica cuántica.

a algo más básico. Así pues, concluye Maudlin, no se puede justificar la doctrina del estatismo físico como algo inspirado en la práctica científica.

Después de descartar la doctrina de separabilidad con evidencia científica dura y la sostenibilidad de la doctrina del estatismo físico como algo inspirado en la ciencia o en la práctica científica, Maudlin no encuentra razones para sostener un humeanismo como el propuesto por Lewis. Incluso la motivación inspirada por el principio de parsimonia le parece a Maudlin un prejuicio metafísico que no tendría por qué tomar un papel relevante aquí. Quienes recurren al principio de parsimonia para propender por un humeanismo están preocupados por la idea de que aceptar las leyes de la naturaleza como primitivos —como una categoría ontológica extra— multiplica innecesariamente los entes. La respuesta de Maudlin es que si lo que quiere el humeanista es defender un fisicalismo fuerte y su fuente de inspiración, la ciencia, no tiene ningún reparo en aceptar a las leyes de la naturaleza como algo extra que gobierna el comportamiento de las cosas físicas del mundo, entonces, no hay razones para tener tantos escrúpulos en aceptarlas como ontológicamente primitivas.

Con respecto a lo anterior, me parece que Maudlin falla al no considerar que el hecho de que los científicos usen una forma de hablar en la que *parecen* aceptar a las leyes de la naturaleza como algo “extra” no implica que de hecho las acepten así y mucho menos es justificación suficiente para que el filósofo lo haga. La labor del filósofo, en estos casos, es, precisamente, clarificar el discurso científico para darle sentido dentro de una concepción metafísica global. Como vimos al comienzo de este capítulo, por ejemplo, una cosa son las *leyes científicas* y otra cosa son las *leyes de la naturaleza*. Lo que exige el compromiso naturalista es que las propuestas metafísicas no contradigan los resultados de la mejor ciencia actual ni postulen entidades sobrenaturales que no cumplen con el principio de cierre causal³⁸. Lo que debe interesar al filósofo es lo que cada ciencia

³⁸ Entendiendo el principio de cierre causal como se definió en la introducción a este trabajo.

puede decir acerca de su objeto de estudio particular a partir de bases empíricas sólidas; de ahí en adelante empieza el trabajo filosófico, y, aunque la ciencia y la filosofía se retroalimenten constantemente, en ninguno de los dos ámbitos debe confundirse el papel de cada una de ellas.

Así pues, de las dos críticas que hace Maudlin al humeanismo —una en contra de la separabilidad y la otra en contra del estatismo físico— la única que debe preocuparnos es la que señala que la doctrina de separabilidad, en la que se fundamenta el principio de superveniencia humeana de Lewis, parece estar siendo desvirtuada por los resultados de la mecánica cuántica. Dado esto, en lo que sigue me concentraré en estudiar e intentar dar solución a dicho problema.

4. Sumario

En el presente capítulo se han estudiado las principales propuestas filosóficas con respecto a la noción metafísica de leyes de la naturaleza, las cuales se pueden clasificar en dos grandes grupos: necesitaristas y regularistas. Las propuestas necesitaristas parten de lo que para sus defensores es un supuesto fundamental: que los entes físicos se comportan necesariamente de acuerdo a las leyes de la naturaleza que son metafísicamente independientes de ellos. Dentro de las propuestas necesitaristas particulares encontramos el universalismo, el primitivismo y el reduccionismo.

El universalismo identifica a las leyes de la naturaleza con relaciones de necesidad entre universales; esto significa que no sólo asume la existencia de universales —lo cual es ya de por sí cuestionable desde una perspectiva filosófica naturalista—, sino que supone la existencia de una relación entre ellos que es metafísicamente anterior a los objetos particulares y a los universales mismos. El universalismo no sólo se aleja de las aspiraciones naturalistas por defender la existencia de entidades extrafísicas, sino que no da cuenta satisfactoria de la relación que postula sin apelar a propiedades modales.

Por su parte, el primitivismo de Maudlin busca dar cuenta de las nociones modales postulando a las leyes de la naturaleza como entidades primitivas. Si bien ésta es una propuesta naturalista interesante, tiene el problema de que parece multiplicar innecesariamente los entes. Antes de comprometernos con la existencia de una nueva categoría ontológica, deberíamos considerar seriamente la posibilidad de dar cuenta de las leyes de la naturaleza apegándonos al principio metodológico de parsimonia.

Por último, entre las concepciones necessitaristas, los reduccionistas defienden que las leyes de la naturaleza se reducen ontológicamente a las propiedades físicas de los objetos. Pero dichas propiedades son definidas, en este tipo de propuesta, recurriendo a nociones modales, lo cual, como ya he dicho, se aleja del objetivo naturalista de construir una metafísica libre de nociones modales primitivas.

Finalmente, la concepción regularista de David Lewis, basada en la tesis de superveniencia humeana, propone una visión de las leyes de la naturaleza como supervenientes a cuestiones de hecho particular locales que no apela a ninguna característica modal metafísicamente fundamental, es decir, pretende ser una propuesta metafísica naturalista que no postula entidades extrafísicas. El problema es que los resultados de la mecánica cuántica parecen ir en contra de uno de los supuestos fundamentales sobre los que descansa dicha tesis de superveniencia, lo que ha llevado a sus críticos a proclamar como fallido el proyecto naturalista de Lewis.

En lo que sigue estudiaré a detalle la posibilidad de salvar la propuesta humeana de Lewis de las amenazas que le impone la mecánica cuántica. Para esto será necesario hacer un análisis filosófico de lo que implica el formalismo de la teoría cuántica y sus posibles interpretaciones metafísicas.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS DE LA MECÁNICA CUÁNTICA

La mecánica cuántica es, hasta el momento, la teoría más exitosa que ha resultado de la investigación científica. Las predicciones observables que se pueden derivar de ella son tan variadas, novedosas y precisas que parece inconcebible prescindir actualmente de esta teoría, a pesar de lo poco intuitiva que resulta en muchos aspectos y de los graves problemas conceptuales que se evidencian en el planteamiento de su versión estándar³⁹. Dado dicho éxito, y tomando como base las motivaciones naturalistas presentadas en la introducción a esta investigación, una teoría metafísica contemporánea no puede simplemente hacer caso omiso de las lecciones que la mecánica cuántica intenta enseñarnos, aun cuando éstas no resulten del todo claras. Es más, justo por esto último, la mecánica cuántica debería convertirse en reto y fuente de inspiración para el metafísico contemporáneo que busca responder a las preguntas fundamentales acerca de *qué es lo que hay* y *cómo es aquello que hay*.

En el presente capítulo me aproximo a los postulados básicos de la teoría de la mecánica cuántica con el objetivo de entender los fundamentos del problema que ésta impone sobre la tesis metafísica de superveniencia humeana

³⁹ Se entiende como “versión estándar” o “interpretación estándar” de la mecánica cuántica al formalismo matemático tradicional por medio del cual se hacen predicciones exitosas sobre el dominio cuántico y a una forma particular de interpretarlo —aquella que se enseña en los libros de texto de física—. También conocida como “interpretación de Copenhague”, se remonta a la década de 1920 y se identifica con figuras como Niels Bohr, Werner Heisenberg, Max Born, entre otros científicos y filósofos de la época, que buscaban plantear una primera concepción general del mundo cuántico con base en los avances producidos en dicho campo desde los descubrimientos de Max Plank en 1900. Si bien no se puede afirmar que estos autores estuvieran perfectamente de acuerdo en cómo interpretar las consecuencias de asumir el formalismo, se da por sentado que hay unos principios básicos que se sostienen a partir de esa postura, que hoy se considera como la postura ortodoxa.

estudiada en el capítulo anterior. También estudio el *problema de la medición*, un problema conceptual que enfrenta la mecánica cuántica estándar y que, como veremos, debe ser solucionado antes de entrar a analizar las posibles interpretaciones metafísicas de la teoría. Finalmente, se ponen en consideración las principales propuestas de solución al problema de la medición actualmente sobre la mesa, con miras a establecer su relación con el problema de la superveniencia humeana.

1. Mecánica cuántica: conceptos básicos

Antes que nada, cabe mencionar que no es un objetivo del presente texto hacer una presentación exhaustiva y detallada del formalismo de la mecánica cuántica y mucho menos del panorama histórico en el cual se ha desarrollado dicha teoría. Para los objetivos de mi investigación, bastará con introducir de manera general las nociones fundamentales de la teoría cuántica estándar no-relativista⁴⁰ haciendo énfasis en aquellas que resultarán relevantes para el estudio metafísico que me ocupa.

La mecánica cuántica es una teoría física fundamental que busca dar cuenta de las características y el comportamiento de los sistemas cuánticos (sistemas físicos entendidos a escala subatómica). Dar cuenta del *estado* de un sistema físico en un instante dado consiste en una especificación completa de aquellas propiedades del sistema que cambian en el tiempo (Ismael, 2015). Dar cuenta del comportamiento de un sistema físico consiste en describir cómo evoluciona su estado a través del tiempo.

El *espacio de estados* de un sistema físico es un espacio formado por todos los posibles estados del sistema, es decir, es un espacio que contiene todas las posibles combinaciones de las propiedades físicas que caracterizan el sistema en

⁴⁰ Sobre la relación entre la teoría cuántica estándar no-relativista y las teorías cuánticas relativistas ver (Albert, 1992, págs. 59-60).

cuestión. En mecánica clásica especificar el estado físico de un sistema consiste típicamente en especificar los valores de las propiedades de *posición* y *momento* para cada una de las partículas que conforman el sistema. Imaginemos un sistema compuesto por una sola partícula. Para representar la propiedad de posición de la partícula necesitamos un espacio tridimensional que contenga todas las posiciones posibles de la partícula. La posición de la partícula en un tiempo específico se representa con un punto en ese espacio tridimensional. Para representar la propiedad de momento se necesitan, igualmente, tres dimensiones. Así que para representar el espacio de estados de la partícula se requiere un espacio de seis dimensiones, tres dimensiones para la posición y tres dimensiones para el momento. Este espacio incluye todas las posibles combinaciones de las dos propiedades que caracterizan los sistemas clásicos. Ahora bien, para representar el estado de un sistema de n partículas se requerirá un espacio de $6n$ dimensiones: seis dimensiones para cada partícula. Dado esto, el estado físico de un sistema clásico se representa, entonces, como un punto en un espacio de estados $6n$ -dimensional que se conoce como *espacio fase*.

Ahora, para el caso de los sistemas cuánticos existen dos formas usuales de representar los estados físicos: como vectores en un *espacio de Hilbert* o como funciones que van de elementos de un *espacio de configuración* a los números complejos. Como veremos, la manera de representar los estados físicos cuánticos va a tener repercusiones importantes a la hora de entrar a evaluar las implicaciones metafísicas de la teoría.

1.1. Estados cuánticos representados como vectores en espacios de Hilbert

Los espacios de Hilbert son una clase especial de espacio vectorial. Un espacio vectorial es un conjunto de vectores V dotado de dos operaciones, denominadas típicamente *suma* y *producto por un escalar*, tales que:

- 1) La *suma* de cualquier par de vectores del conjunto V da como resultado un vector que también pertenece al conjunto V .
- 2) El *producto* (multiplicación) de cualquier vector del conjunto V por un *escalar* da como resultado un vector que también pertenece al conjunto V . (Los escalares pueden ser números reales o números complejos, para el caso de los espacios vectoriales complejos).

Un espacio de Hilbert es un espacio vectorial en el que, además, está definida una tercera operación: la operación de multiplicación entre vectores, denominada típicamente *producto interno*:

- 3) El *producto interno* de dos vectores del conjunto V da como resultado un escalar.⁴¹

Los espacios de Hilbert poseen una estructura interna característica que resulta especialmente apropiada para representar los estados físicos en mecánica cuántica. Los estados cuánticos pueden representarse por medio de vectores de magnitud igual a 1 en un espacio de Hilbert complejo. Estos vectores se conocen como *vectores estado*. Así como en mecánica clásica un punto en el espacio fase codifica el valor de todas las propiedades del sistema físico, un *vector estado* en un espacio de Hilbert codifica el valor de todas las propiedades del sistema físico cuántico.

Como se vio antes, el número de dimensiones del espacio de estados en mecánica clásica depende de los grados de libertad de cada propiedad. Tanto la

⁴¹ En términos generales, $\langle A|B \rangle$ es el producto interno de dos vectores $|A\rangle$ y $|B\rangle$ en un espacio vectorial V sólo si:

i) $\langle A|A \rangle = |A|^2$ y $\langle A|A \rangle = 0$ si y sólo si $|A\rangle = 0$

ii) $\langle A|B \rangle = \langle B|A \rangle^*$

iii) $\langle A|B + C \rangle = \langle A|B \rangle + \langle A|C \rangle$

A partir de lo anterior se puede obtener la magnitud del vector $|A\rangle$ como $|A| = \sqrt{\langle A|A \rangle}$. Tener esto presente será útil para algunos conceptos que se abordan más adelante.

posición como el momento tienen tres grados de libertad respectivamente —las tres dimensiones espaciales—. Un espacio de estados de seis dimensiones permite representar la infinidad de posiciones y momentos posibles de una partícula. Ahora bien, el número de dimensiones de un espacio de Hilbert que representa el espacio de estados de un sistema cuántico depende del número máximo de *valores definidos* que el sistema puede tener para una propiedad. Imaginemos que la única propiedad que tiene una computadora es la de estar encendida o apagada. El número de valores definidos posibles para esa propiedad es, entonces, dos: o encendido o apagado. Los posibles estados definidos para una propiedad se representan por medio de vectores mutuamente perpendiculares u *ortogonales*⁴², lo que da lugar, en este caso, a un espacio de Hilbert bidimensional. Por su parte, un espacio de Hilbert utilizado para representar un sistema con la propiedad de posición tendría dimensiones infinitas no numerables: una dimensión por cada posible estado definido de posición, infinitos vectores mutuamente ortogonales.

Una característica especialmente relevante de los espacios de Hilbert es que exhiben la propiedad de *linealidad* (Wallace D., 2013, pág. 206): si $|\psi\rangle$ y $|\varphi\rangle$ son vectores en el espacio de estados, entonces existe un vector de estado $|\omega\rangle = \alpha|\psi\rangle + \beta|\varphi\rangle$, donde α y β son números complejos que satisfacen $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ —es decir, el vector resultante de la suma también tiene magnitud unitaria—. Nótese que esto viene de las propiedades 1) y 2) de los espacios vectoriales mencionadas más arriba: el resultado de multiplicar cada vector por un escalar y luego sumarlos da como resultado un vector dentro del mismo espacio de estados, es decir, es un estado físico posible del sistema.

¿Qué pasa si $|\psi\rangle$ y $|\varphi\rangle$ representan dos vectores mutuamente ortogonales?, en otras palabras, ¿qué significa la suma ponderada de dos vectores que

⁴² La noción de *ortogonalidad* es una generalización de la noción geométrica de perpendicularidad. Dos vectores son ortogonales si y sólo si el producto interno entre ellos es igual a cero.

representan cada uno un valor definido para una propiedad específica del sistema? Supongamos que el vector $|\psi\rangle$ representa la propiedad definida ‘encendido’ y el vector $|\varphi\rangle$ representa la propiedad definida ‘apagado’. Si $|\omega\rangle = \alpha|\psi\rangle + \beta|\varphi\rangle$, con $\alpha \neq 0$ y $\beta \neq 0$, entonces el vector estado $|\omega\rangle$ representa un estado físico con valor no definido para la propiedad encendido/apagado, es decir, el sistema en el estado ω está en un estado de *superposición* para dicha propiedad.

Así pues, como ya he mencionado, la linealidad de los espacios de Hilbert es una característica que resulta particularmente relevante para la mecánica cuántica, ya que por medio de ésta pueden representarse los “misteriosos” estados de *superposición* —estados físicos con valores no-definidos para una propiedad— que tienen lugar en los sistemas cuánticos y en torno a los cuales gira gran parte de los problemas que se identifican en la formulación estándar de la teoría.

Un estado de *superposición* se presenta cuando el estado físico de un sistema no puede representarse con un único elemento de los considerados como estados definidos, sino como una suma de dos o más de ellos, de manera que no puede afirmarse que el sistema se encuentra en uno de ellos, en todos ellos o en ninguno de ellos. Un ejemplo ilustrativo típico sobre sistemas físicos en superposición es el del famoso *gato de Schrödinger*. En 1935⁴³, el físico Erwin Schrödinger propuso un experimento mental para ilustrar un problema que él veía en la mecánica cuántica estándar a la hora de ser aplicada a objetos macroscópicos que se entienden como compuestos por micropartículas. En términos generales, el experimento consiste en imaginar un gato dentro de una caja cerrada que contiene, además, un dispositivo que libera un veneno mortal. El dispositivo se activa, o no, dependiendo del estado físico de cierta partícula subatómica. Según la mecánica cuántica estándar, un sistema físico en superposición permanecerá en ese estado hasta que se realice sobre él una

⁴³ Ver (Schrödinger, 1935).

medición —observación—. Si se utiliza la teoría para describir la situación del gato, resulta que su estado físico depende del estado —o está *enredado* con el estado— de la partícula subatómica que antes de abrir la caja se encuentra en superposición. Así, antes de abrir la caja en la que está encerrado, el gato se encuentra en un estado de superposición de los estados definidos ‘vivo’ y ‘muerto’. ¿Qué significa que el gato esté en superposición de estar vivo y muerto? ¿Qué podría estar sintiendo el gato en ese estado de superposición? La dificultad de responder a este tipo de preguntas desde la mecánica cuántica estándar es justo lo que Schrödinger quería señalar con este experimento mental. Volveré a ello más adelante.

Continuemos, por ahora, con la reconstrucción del formalismo de la mecánica cuántica en espacios de Hilbert. A las propiedades físicas medibles de un sistema se les conoce como *observables*⁴⁴ y en la teoría cuántica son asociadas con *operadores hermitianos* en el respectivo espacio de Hilbert del sistema.

Un operador en espacios vectoriales es un objeto matemático que permite mapear cada vector de un espacio vectorial en otro vector del mismo espacio, es decir, podemos entender un operador O como un mecanismo al que se le da como elemento de entrada un vector perteneciente a un espacio vectorial, por ejemplo $|\varphi\rangle$, y entrega a la salida un vector perteneciente al mismo espacio vectorial, por ejemplo $|\varphi'\rangle$:

$$O|\varphi\rangle = |\varphi'\rangle$$

Se dice que un vector $|\varphi\rangle$ es un *eigenvector* del operador O con *eigenvalor* λ , si y sólo si es el caso que $O|\varphi\rangle = \lambda|\varphi\rangle$, es decir, si y sólo si el resultado de aplicar el operador O sobre el vector $|\varphi\rangle$ es un vector que apunta en la misma dirección que $|\varphi\rangle$.

⁴⁴ El término “*observable*” aquí es un término técnico; no debe confundirse con la noción de “observable” que con frecuencia se utiliza en filosofía de la ciencia, como aquello a lo que se puede tener acceso directo por medio de los sentidos.

Los *operadores hermitianos* son operadores como los que acabo de describir, que, además, tienen otras ciertas características, por ejemplo:

- 1) en un espacio N-dimensional un operador hermitiano tiene, al menos, un conjunto de N eigenvectores mutuamente ortogonales que forman una base ortonormal⁴⁵;
- 2) los eigenvalores de tales eigenvectores son todos números reales.

Recordemos que la dimensionalidad de un espacio de Hilbert que representa el espacio de estados de un sistema cuántico está dada por el número máximo de valores definidos posibles que puede tener el sistema para una propiedad física. Teniendo en cuenta esto y las características de los operadores hermitianos —entre ellas, las que acabo de mencionar, pero no sólo ésas⁴⁶—, resulta que tales operadores pueden ser fructíferamente asociados en el formalismo matemático de la teoría con propiedades físicas medibles. De hecho:

- 3) cualquier operador hermitiano en un espacio vectorial específico será asociado con una propiedad medible del sistema físico cuyo espacio de estados es representado por dicho espacio; y
- 4) cualquier vector en un espacio vectorial específico es invariablemente eigenvector de algún operador hermitiano en dicho espacio, es decir, siempre hay una propiedad medible para la cual el sistema físico representado por dicho espacio tiene un valor definido. (Albert, 1992, pág. 40)

Así pues, dadas las características matemáticas de los espacios de Hilbert y de los operadores hermitianos, la mecánica cuántica estándar establece una regla que permite relacionar los operadores hermitianos con nociones físicas, a

⁴⁵ Se le llama *base ortonormal* a cualquier conjunto de N vectores mutuamente ortogonales de magnitud 1 en un espacio vectorial N-dimensional. Cualquier vector que pertenezca a dicho espacio vectorial puede ser representado como una suma “ponderada” de vectores que forman una base ortonormal.

⁴⁶ Para más información sobre operadores hermitianos (Albert, 1992, págs. 40-41).

saber, la *regla eigenvalor-eigenvector*. Por medio de esta regla se afirma que un sistema físico en el estado ψ tiene el valor λ de la propiedad física representada por el operador O , si y sólo si $|\psi\rangle$ es un eigenvector de O con eigenvalor λ , es decir, si y sólo si el resultado de aplicar el operador O sobre el vector $|\psi\rangle$ da como resultado $\lambda|\psi\rangle$, donde λ es un número real que representa un valor definido de la propiedad en cuestión.

Para que lo anterior quede más claro, retomemos uno de los ejemplos de Albert (1992, 31) y adaptémoslo a la propiedad “encendido/apagado” mencionada hace unos párrafos —de ahora en adelante, para simplificar, la propiedad p —. Los dos posibles estados definidos en los que puede encontrarse un sistema con la propiedad p se representan por medio de dos vectores ortogonales en el espacio de Hilbert. Sea $|on\rangle$ el vector estado del sistema cuando éste se encuentra “encendido” y $|off\rangle$ el vector estado del sistema cuando éste se encuentra “apagado”:

$$|on\rangle = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad |off\rangle = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Recordemos que los estados definidos no son los únicos estados posibles en el caso de los sistemas cuánticos; aparte de ellos, el sistema podría encontrarse en un estado de superposición. Así, si $|\varphi\rangle$ es el vector estado del sistema en un momento dado, dicho vector puede tomar cualquiera de los siguientes valores:

1. $|\varphi\rangle = |on\rangle$
2. $|\varphi\rangle = |off\rangle$
3. $|\varphi\rangle = \alpha|on\rangle + \beta|off\rangle$

Ahora, supongamos que el siguiente operador representa la propiedad p :

$$O_p = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

Se estipula que cuando “ $p = 1$ ” significa que el sistema está “encendido” y cuando “ $p = -1$ ” significa que el sistema está “apagado”.

Revisemos un primer caso. Supongamos que el vector estado del sistema en un momento dado es el siguiente:

$$|\varphi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|on\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|off\rangle$$

Reemplazando los vectores y haciendo la suma correspondiente tenemos:

$$|\varphi\rangle = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

Ahora aplicamos el operador O_p sobre el vector $|\varphi\rangle$ para determinar si es un eigenvector de dicho operador:

$$O_p|\varphi\rangle = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

$$O_p|\varphi\rangle = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \neq \lambda|\varphi\rangle$$

Dado que no hay un valor de λ para el cual $O_p|\varphi\rangle = \lambda|\varphi\rangle$, entonces se concluye que $|\varphi\rangle$ no es un eigenvector del operador O_p , es decir, que el sistema no tiene un valor definido para la propiedad p .

Revisemos un segundo caso. Supongamos que el vector estado del sistema en un momento dado es $|\varphi\rangle = |off\rangle$. Aplicando el operador O_p , tenemos:

$$O_p|\varphi\rangle = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$O_p|\varphi\rangle = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} = -1 \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \lambda|\varphi\rangle$$

En este caso se encuentra que $\lambda = -1$, esto significa que $|\varphi\rangle$ es un eigenvector del operador O_p con eigenvalor -1 . Esto quiere decir que el sistema tiene un valor definido para la propiedad p : “ $p = -1$ ”, lo cual, según lo estipulado, significa que el sistema está “apagado” —justo lo que esperábamos—.

Hasta aquí he explicado, en términos generales, cómo se representan los sistemas cuánticos de manera sincrónica:

1. El estado de un sistema cuántico en un momento dado se representa por medio de un vector en el espacio de Hilbert; un vector que “codifica” todas las propiedades del sistema.

2. Si queremos saber el valor de una propiedad específica del sistema en un momento dado, lo que se hace es aplicar el operador hermitiano correspondiente sobre el vector estado y determinar si es o no un eigenvector de dicho operador.

Ahora bien, para dar cuenta de la dinámica de los sistemas cuánticos, es decir, de cómo evolucionan en el tiempo, la mecánica cuántica cuenta con la *ecuación de Schrödinger*, una ecuación que describe una evolución continua, determinista y lineal para este tipo de sistemas. La evolución es determinista porque si se conoce el estado del sistema en un momento dado, la ecuación de Schrödinger permite determinar de manera única sus estados tanto hacia el futuro como hacia el pasado. La evolución es lineal porque respeta la linealidad de los espacios de Hilbert: sea el vector estado $|\omega\rangle = \alpha|\psi\rangle + \beta|\varphi\rangle$; si el vector estado $|\psi\rangle$ evoluciona en un tiempo t al vector estado $|\psi'\rangle$ y el vector estado $|\varphi\rangle$ evoluciona en un tiempo t al vector estado $|\varphi'\rangle$, la dinámica descrita por la ecuación de Schrödinger asegura que el vector estado $|\omega\rangle$ evolucionará en un tiempo t al vector estado $|\omega'\rangle = \alpha|\psi'\rangle + \beta|\varphi'\rangle$.

La siguiente expresión corresponde a la forma usual de escribir la ecuación de Schrödinger:

$$(1) \quad \hat{H}\Psi = i\hbar \frac{\partial\Psi}{\partial t}$$

Donde Ψ es la función de onda⁴⁷ o estado cuántico del sistema y \hat{H} es un operador —el hamiltoniano— que representa la energía total del sistema.

⁴⁷ La función de onda es otra forma de representar el estado cuántico de un sistema y será estudiada en la sección 1.2. del presente capítulo.

Ahora bien, una vez que sabemos cómo evoluciona teóricamente el sistema, lo que queda es recurrir a la experimentación para constatar que las predicciones que se derivan de la teoría corresponden efectivamente a lo que ocurre en la práctica. Recordemos que los estados cuánticos con frecuencia son superposiciones de diferentes estados definidos de una misma propiedad, es decir, son estados representados por vectores que no son eigenvectores de la propiedad en cuestión, por lo que no tienen un valor definido para ésta —cosa que, de acuerdo con la experiencia, es imposible observar en un laboratorio—. El caso es que siempre que se realiza una medición se obtiene un valor definido para la propiedad medida: el gato o está vivo o está muerto, pero no las dos o ninguna de las dos o un poquito vivo y un poquito muerto; esto es, cuando se abre la caja sólo observamos al gato en uno de los dos posibles estados definidos para la propiedad “estar vivo”, incluso si la ecuación de Schrödinger indica que justo en ese instante el estado es de superposición para dicha propiedad. Así pues, ¿cómo se interpreta la expresión matemática que representa una superposición? La formulación estándar de la mecánica cuántica responde a esta pregunta con lo que se conoce como la *regla de Born*.

A diferencia de la ecuación de Schrödinger, que establece de manera determinista cuál será el estado de un sistema en un tiempo dado, la regla de Born da cuenta del carácter azaroso que se evidencia en los experimentos. Como se ha dicho, en la representación vectorial un estado cuántico se representa por un vector de magnitud unitaria. Por ejemplo, sea ψ el estado cuántico de un sistema tal que:

$$(2) \quad |\psi\rangle = \alpha_1|a_1\rangle + \alpha_2|a_2\rangle + \dots + \alpha_n|a_n\rangle$$

En este caso, la magnitud del vector está dada por:

$$(3) \quad |\alpha_1|^2 + |\alpha_2|^2 + \dots + |\alpha_n|^2 = 1$$

Si lo relacionamos con la regla eigenvalor-eigenvector, tenemos que los vectores $|a_i\rangle$ son todos eigenvectores, con eigenvalores λ_i , de un operador A que representa una propiedad específica que queremos medir; mientras que los valores α_i son los coeficientes de expansión del vector de estado $|\psi\rangle$ en la base generada por los eigenvectores de A . Lo que hace la regla de Born es interpretar $|\alpha_i|^2$ como la probabilidad de que al medir la propiedad A sobre el sistema el resultado sea una observación definida con valor λ_i . Nótese que, dado que: i) la magnitud de los vectores de estado siempre es igual a 1, ii) los vectores $|a_i\rangle$ son mutuamente ortogonales y iii) el valor de $|\alpha_i|^2$ siempre es positivo menor o igual que 1 para satisfacer la ecuación (3); esta interpretación cumple con los axiomas de las probabilidades.

Con la regla de Born queda establecida en mecánica cuántica estándar la relación que hay entre el estado de un sistema y lo que se observa a la hora de medir sobre él alguna propiedad. Los resultados obtenidos en el laboratorio han confirmado satisfactoriamente el cumplimiento de esta regla. Así pues, con la ecuación de Schrödinger se puede predecir cuál será el estado de un sistema en un momento particular, pero, dada la imposibilidad de observar superposiciones, es la regla de Born, aplicada sobre el estado predicho por Schrödinger, la que nos señala qué debemos esperar de nuestros experimentos al momento de observar los resultados.

Aún queda una cuestión por resolver en este sentido. Como ya hemos dicho, resulta que cuando se realiza una medición de una propiedad sobre un sistema, se obtiene siempre un valor definido —o vemos al gato vivo o vemos al gato muerto— a pesar de que el estado al momento de la medición no sea un eigenvector de la propiedad, es decir, a pesar de que el estado sea una superposición para dicha propiedad —gato vivo en superposición con gato muerto—. Experimentalmente se comprueba que si sobre ese mismo sistema, sin haber intervenido de ninguna otra manera sobre él, se vuelve a medir la misma propiedad, la probabilidad de obtener el mismo resultado que en la primera

medición siempre es igual a 1. ¿Qué sucede, entonces, con los sistemas cuánticos durante el proceso de medición? La formulación estándar de la mecánica cuántica responde a esta pregunta agregando un nuevo postulado a su dinámica: el llamado *postulado de proyección* o *postulado del colapso*. Básicamente, lo que dice el postulado de proyección es que al momento de realizar una medición sobre un sistema cuántico el sistema *colapsa* al estado que resulta de la medición. En otras palabras, el estado del sistema salta, cambia súbitamente para convertirse en un estado que sí es eigenvector de la propiedad medida —y que es el que de hecho se observa en la medición—. No sobra enfatizar que, según este postulado, no es simplemente que al medir estemos observando una de las posibilidades mientras el sistema persiste en su estado de superposición, sino que, de hecho, al medir hemos cambiado el estado del sistema definitivamente. El proceso de colapso elimina todos menos uno de los estados definidos que estaban superpuestos justo en el momento de la medición. Por lo tanto, si se mide nuevamente la misma propiedad sobre el sistema se obtendrá el mismo resultado —siempre y cuando el sistema no haya tenido ninguna otra interacción entre las dos mediciones—.

Hasta aquí hemos presentado en términos generales la formulación de la teoría de la mecánica cuántica en su versión estándar. Veremos más adelante que dicha formulación, a pesar de su innegable éxito empírico, presenta un problema fundamental relacionado con el postulado del colapso, el llamado *problema de la medición*. Por ahora, continuemos con la presentación de las nociones básicas de la teoría.

1.2. Estados cuánticos representados por medio de funciones de onda

Recordemos que había mencionado un segundo tipo de representación de los estados cuánticos —diferente de la representación vectorial en espacios de Hilbert—, a saber, por medio de una función que asigna a cada punto de un

llamado *espacio de configuración* un valor en los números complejos. A esta función se le conoce con el nombre de *función de onda* y es sobre ella que gira gran parte de la discusión metafísica con respecto a la mecánica cuántica actualmente.

Como ya he señalado, la dimensionalidad de un espacio de Hilbert que representa un espacio de estados cuánticos corresponde al número máximo de estados definidos posibles del sistema para una propiedad específica. Para el caso de propiedades como posición, momento o energía, existen infinitos valores definidos posibles, es decir, el espacio de Hilbert correspondiente tiene infinitas dimensiones. Cualquier vector de estado en un espacio de Hilbert N-dimensional puede ser expandido y expresado como una suma de N vectores que forman una base ortonormal⁴⁸. Esta forma de representar estados cuánticos resulta útil para casos en los que el espacio tiene una dimensión finita, pero para los casos en los que las dimensiones son infinitas se utiliza otro tipo de notación que cumple el mismo propósito: la representación por medio de funciones de onda.

Lo que se conoce generalmente como *función de onda*, $\psi(x)$, es una forma de codificar los coeficientes de expansión de un vector de estado $|\psi\rangle$ en la base de posiciones^{49,50}. Al haber infinitas posiciones posibles, hablar de la probabilidad de encontrar al sistema en un punto específico no tiene sentido, pues tal probabilidad tiende a cero. La pregunta que tiene sentido, en este caso, es acerca de la probabilidad de que el sistema se encuentre en determinada región del espacio.

⁴⁸ Como en la ecuación (2).

⁴⁹ Aunque típicamente la función de onda se refiere a la base de posiciones, nótese que es posible expandir un vector de estado en otras bases de eigenvectores con un rango continuo y, de esta manera, generar funciones de onda de otro tipo de propiedades como momento o energía, por ejemplo.

⁵⁰ Técnicamente, para los estados de posición —al ser infinitos no numerables— no tiene sentido hablar de eigenvectores ni de coeficientes de expansión —porque tienden a cero—. Aun así, poner a la función de onda en esos términos es algo a lo que recurren los físicos porque resulta ser una manera sencilla de capturar el significado de la función de onda.

Como ya vimos, para el caso de las propiedades con un número finito de valores definidos posibles, el cuadrado del valor absoluto de cada uno de los coeficientes de expansión del vector estado en la base de la propiedad de interés se interpreta como la probabilidad de que al medir el sistema se obtenga un resultado específico. Retomemos el siguiente vector estado en el cual queremos medir la propiedad encendido/apagado p :

$$|\varphi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|on\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|off\rangle$$

A partir de la regla de Born podemos concluir que al hacer una medición de la propiedad p sobre el sistema, tenemos una probabilidad de $\left|\frac{1}{\sqrt{2}}\right|^2 = 0.5$ de observar el estado definido $|on\rangle$ y 0.5 de observar el estado definido $|off\rangle$. La probabilidad de observar cualquiera de los dos sería $P(|on\rangle) + P(|off\rangle) = 1$.

Ahora bien, de manera análoga, en el caso de una propiedad con valores continuos como la propiedad de *posición*, lo que se hace, para determinar la probabilidad de que el sistema se encuentre en una región específica, es sumar las probabilidades relativas a cada punto dentro de la región. Formalmente esto se representa de la siguiente forma (donde a y b son los límites de la región):

$$P = \int_a^b |\psi(x)|^2 dx$$

De esta manera puede interpretarse $|\psi(x)|^2$ como una función densidad de probabilidad que da información de dónde es más probable o menos probable encontrar a los elementos de un sistema cuántico, si se realiza una medición de su posición. Esto corresponde a la regla de Born en la representación de estados cuánticos por medio de una función de onda.

Ahora bien, la interpretación estadística no es la única interpretación posible de la función de onda. Si se asume una posición realista con respecto a la

mecánica cuántica⁵¹, otra opción es interpretar metafísicamente a la función de onda tal y como aparece a primera vista en la teoría, es decir, como el estado de un sistema cuántico en un instante determinado. Lo que hay detrás de esta consideración es la idea de que “[a]unque el estado cuántico puede estar conectado con lo que podemos esperar de mediciones futuras, esta conexión no es analítica porque el estado cuántico tiene una realidad independientemente de las mediciones que podamos hacer del mismo” (Ney, 2013, pág. 15). En el capítulo III me concentraré en estudiar las implicaciones y posibles posturas que se pueden tomar si se asume un realismo de la función de onda.

Volviendo al formalismo, he mencionado que la función de onda asigna valores a puntos en un *espacio de configuración*. La representación en un espacio de configuración es una forma de condensar información acerca de localizaciones de muchas partículas. Así, un sistema de N partículas se representa con N puntos en el espacio tridimensional, pero con un solo punto en el espacio de configuración $3N$ -dimensional. Por ejemplo, tenemos un sistema de dos partículas, una ubicada en el punto $(0,0,1)$ del espacio 3D y otra en el punto $(1,1,0)$ del mismo espacio; esto puede representarse en un espacio de configuración de seis dimensiones —2 partículas con 3 coordenadas espaciales cada una, $2 \times 3 = 6$ — con un solo punto ubicado en las coordenadas $(0,0,1,1,1,0)$, donde las primeras tres coordenadas corresponden a la ubicación de la primera partícula en el espacio 3D y las siguientes tres coordenadas corresponden a la ubicación de la segunda partícula.⁵² La función de onda puede ser pensada, entonces, como una función en ese espacio de configuración. Nótese que, si hay una función de onda del universo que dé cuenta de todas las partículas que hay

⁵¹ Sobre realismo de la mecánica cuántica y la función de onda, ver capítulo III.

⁵² Esta descripción de un *espacio de configuración* corresponde a una interpretación general del mismo, tal y como se utiliza para representar estados de sistemas pertenecientes a otras teorías diferentes a la mecánica cuántica (a la mecánica clásica, por ejemplo). Más adelante veremos que hay quienes argumentan que ésta no es necesariamente la interpretación que debe adoptarse en mecánica cuántica con respecto al espacio en el que “vive” la función de onda.

en el mismo, la dimensionalidad del espacio de configuración sería 3 veces el número de partículas que haya en el universo. Si asumimos que el universo tiene una cantidad grande, pero finita, de partículas, esa dimensionalidad resulta altísima... altísima, pero no infinita, como ocurría en la representación en espacios de Hilbert.

Existe una razón especial para recurrir a la representación de estados de sistemas cuánticos en espacios de configuración, a saber, que muchos de los estados cuánticos de sistemas multipartícula tienen la peculiar característica de ser lo que se conoce como *estados enredados*.

Como ya había mencionado en el capítulo anterior, la característica distintiva de un estado enredado es que no puede ser escrito como el producto de estados individuales de los componentes del sistema. Es más, en un sistema cuántico enredado no es posible hablar del estado físico de cada una de las partes sin hablar del estado físico de todo el sistema. No es solamente que el estado del todo contenga más información que la suma de sus partes, sino que sus partes no poseen un estado individual independiente del estado de todo el sistema.

El siguiente vector estado representa el estado cuántico de un sistema con dos partículas enredadas a y b en la base de la propiedad bivalente ‘*up/down*’:

$$|\varphi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|up\rangle_a|down\rangle_b + \frac{1}{\sqrt{2}}|down\rangle_a|up\rangle_b$$

Según la mecánica cuántica estándar, al hacer una medición de la propiedad indicada sobre el sistema, éste colapsará instantáneamente en uno de los dos términos de la superposición. Así, siempre que se observe el valor ‘*up*’ para la partícula a , el formalismo indica que la partícula b tendrá necesariamente el valor ‘*down*’ y viceversa.

Imaginemos que las dos partículas se encuentran ubicadas en dos galaxias separadas millones de años luz una de otra. Un observador en la galaxia de a hace una medición sobre la partícula a y la observa en el estado $|down\rangle$. ¿Qué

pasa con la partícula b ? Según el formalismo cuántico, cuando el observador de a hace su medición, el sistema enredado y en superposición compuesto por las partículas a y b colapsa instantáneamente en el estado $|down\rangle_a|up\rangle_b$, lo que implica que en ese mismo instante la partícula b colapsa en el estado $|up\rangle$. Dado que a y b están separadas y no interactúan, es decir, dado que no hay ninguna señal que pueda viajar entre las dos partículas y dar cuenta del efecto instantáneo en b del proceso de medición sobre a , se dice que en mecánica cuántica hay influencias no-locales —*no-localidad*—⁵³. Esto tendrá repercusiones importantes en la interpretación metafísica de la teoría.

Volviendo a la cuestión sobre la pertinencia de la representación en el espacio de configuración, pensemos, ahora, que la propiedad de interés es la propiedad de posición. Si se pretende analizar la probabilidad de observar a una de las partículas de un sistema enredado en un punto, resulta que ésta dependerá irremediamente de las probabilidades de encontrar a las demás partículas del sistema en otros puntos. Para capturar esta característica de los sistemas físicos en el formalismo cuántico es necesario hacer uso de grados de libertad espaciales adicionales que pueden ser brindados por el espacio de configuración y es también por esto que la mecánica cuántica recurre a dicho espacio para la representación de los estados físicos que intenta describir.

Las nociones fundamentales de mecánica cuántica estudiadas hasta aquí son la base para abordar apropiadamente —según mi compromiso naturalista— el problema último que me interesa, a saber, la supuesta incompatibilidad entre la tesis de superveniencia humeana y la mecánica cuántica. Con esta base teórica

⁵³ Es importante diferenciar aquí dos sentidos en los que se usa en este trabajo la expresión “no-local”. Por un lado, diremos que una propiedad es *no-local* cuando no puede predicarse de un punto o cuando su valor en un punto no puede definirse sin hacer referencia a otros puntos. Por otro lado, diremos que un fenómeno, una ley o una teoría son *no-locales* cuando admiten relaciones causales instantáneas a distancia que supondrían la existencia de señales que viajan a velocidades superluminales.

pasamos a estudiar ahora algunas cuestiones conceptuales y metafísicas de la teoría cuántica que resultan relevantes para ir delimitando mi investigación.

2. El problema de la medición

El principal problema que se le ha planteado a la mecánica cuántica estándar se conoce como el *problema de la medición*. En esta sección estudio en qué consiste dicho problema y algunas de las estrategias que se han propuesto para resolverlo.

Como veremos, resolver el problema de la medición involucra modificar, en algún sentido, la teoría cuántica estándar. A las teorías alternativas que resultan de una u otra modificación se les conoce en la literatura como *interpretaciones de la mecánica cuántica*. Es importante aclarar que el uso del término ‘interpretaciones’, en este caso, resulta desafortunado. Técnicamente, las llamadas “interpretaciones de la mecánica cuántica” no deben ser entendidas como *lecturas* o formas de entender a la mecánica cuántica estándar, sino como teorías científicas distintas e independientes —con leyes y presupuestos particulares— cuyas predicciones coinciden con las predicciones exitosas de la teoría cuántica estándar. Entre las *interpretaciones* —o teorías cuánticas— propuestas como solución al problema de la medición, las discusiones han girado particularmente en torno a tres de ellas⁵⁴:

- 1) La *mecánica bohmiana*⁵⁵, que se encuentra entre las teorías conocidas como interpretaciones de *variables ocultas*;

⁵⁴ Más adelante en este capítulo explico en qué consiste cada una de ellas, por ahora me limito a mencionarlas.

⁵⁵ También llamada teoría *de Broglie-Bohm* a partir de sus proponentes principales Louis de Broglie (1927) y David Bohm (1952).

- 2) la teoría GRW⁵⁶, que se encuentra entre las interpretaciones de *colapso objetivo*; y
- 3) la interpretación de *muchos mundos*, que se encuentra entre las interpretaciones tipo *Everett*.⁵⁷

Al ser, todas éstas, teorías diferentes entre sí —y diferentes de la teoría cuántica estándar—, también es diferente la ontología que puede llegar a asumirse a partir de ellas. De esta manera, la posible solución al problema de la superveniencia humeana va a depender, de manera importante, de la postura que se asuma frente al problema de la medición.

Según la mecánica cuántica estándar, mientras no se realice una *medición* u *observación* sobre un sistema cuántico, la dinámica de éste estará descrita por la ecuación de Schrödinger: una evolución continua, lineal y determinista de la función de onda del sistema. En caso de que se realice una medición, ocurrirá un *colapso* en la función de onda del sistema. El colapso cuántico consiste en un proceso discontinuo, indeterminista, no-lineal, en el que la función de onda adquiere —colapsa en— un valor definido para la propiedad medida, aun cuando justo en el momento de la medición no lo tuviera; es decir, incluso si la función de onda del sistema en el preciso instante de ocurrir la medición corresponde a una superposición.

El éxito de la teoría cuántica estándar radica en que logra hacer predicciones novedosas⁵⁸ y sorprendentemente precisas acerca de las probabilidades con las

⁵⁶ Aunque existen varias teorías de colapso objetivo, en el presente trabajo hago referencia sólo a una de ellas, a saber, la teoría conocida como GRW (Ghirardi, Rimini, & Weber, 1986). Esta teoría corresponde al modelo inicial y más difundido de teoría cuántica con colapso objetivo.

⁵⁷ Inspiradas en la propuesta de Hugh Everett (1957) que elimina el colapso de la teoría cuántica estándar.

⁵⁸ En filosofía de la ciencia se entiende como predicciones novedosas a aquellas que predicen fenómenos nunca antes observados o que no se han tenido en cuenta en el desarrollo de la teoría.

que se observará determinado valor en una medición⁵⁹. El gran problema es que la teoría no define dentro del formalismo lo que se entiende por “medición” ni cómo, o por qué, se diferencia de otros procesos o interacciones físicas.

Generalmente, los experimentos en mecánica cuántica se conciben como mediciones sobre sistemas microscópicos. Dado que los resultados de una medición son observados a través de instrumentos macroscópicos, un primer intento de dar respuesta al problema de la medición podría ser decir que una medición es el resultado de la interacción entre un sistema microscópico y uno macroscópico. El problema con esta aproximación es, por un lado, que no existe una línea divisoria definitiva que nos permita clasificar entre sistemas microscópicos y sistemas macroscópicos —¿cuántos átomos exactamente deben incorporarse a un sistema para que deje de ser microscópico y empiece a ser macroscópico?—. Por otro lado, los sistemas macroscópicos se entienden como *compuestos* por los mismos elementos microscópicos cuyo comportamiento describe la teoría cuántica. Dado esto, los estados físicos de los sistemas macroscópicos deberían estar igualmente descritos por las leyes de la cuántica.

Como hemos visto, las leyes dinámicas de la mecánica cuántica estándar se plantean para dos casos diferentes: por un lado, la ecuación de Schrödinger define de manera determinista cómo se comportará el sistema en ausencia de un observador; mientras, por otro lado, el postulado del colapso define un evento de naturaleza estocástica —cuyas probabilidades se rigen por la regla de Born— que acaece en el sistema en el momento en el que se realiza una medición sobre él. En cierto sentido, el comportamiento de los sistemas cuánticos está claramente definido por estas dos leyes. La cuestión es que no es del todo claro cuándo se debe usar cada una de ellas. No se supone que una teoría física fundamental, que

⁵⁹ La mecánica cuántica estándar no predice resultados específicos de mediciones, sino las probabilidades de obtener ciertos resultados. Para poner a prueba dichas predicciones, por ejemplo, se realizan múltiples experimentos bajo las mismas condiciones; las frecuencias de los resultados coinciden con las probabilidades predichas por la teoría cuántica estándar y por ello se dice que son exitosas.

pretende dar cuenta del comportamiento objetivo de los sistemas físicos, defina sus leyes en torno a una noción ambigua como la de *medición*. ¿Cómo puede ser que el comportamiento de los sistemas cuánticos dependa del hecho de que un científico decida observarlos o no? ¿En qué momento preciso ocurre un colapso: cuando el aparato de medición entra en contacto con el sistema o cuando el científico observa el resultado? ¿Dónde acaba el sistema cuántico y dónde empieza el aparato de medición?... John Bell⁶⁰ manifiesta con cierto sarcasmo algunas preocupaciones en este sentido:

Parecería que la teoría tiene que ver exclusivamente con ‘resultados de mediciones’ y no tiene nada que decir acerca de nada más. Cuando el ‘sistema’ en cuestión es el mundo entero, ¿dónde ha de encontrarse el ‘medidor’? Adentro, en lugar de afuera, presumiblemente. ¿Qué califica exactamente a algunos subsistemas para jugar este papel? ¿Estuvo la función de onda del mundo esperando para saltar por miles de millones de años hasta que una criatura viviente unicelular apareció? ¿O tuvo que esperar un poco más por un sistema mejor calificado: con un Ph.D.? Si la teoría ha de aplicarse a cualquier cosa que no sean operaciones de laboratorio altamente idealizadas, ¿no estamos obligados a admitir que procesos más o menos ‘tipo-medición’ suceden más o menos todo el tiempo, más o menos en todas partes? ¿Hay, entonces, alguna vez un momento en el que no hay ningún salto y la ecuación de Schrödinger aplica? (Bell, 1987, pág. 117)

La mecánica cuántica estándar simplemente no explica *cómo* ocurre un colapso; no describe en qué consiste una medición ni explica qué particularidad hay en los aparatos de medición —que objetivamente pueden ser entendidos como sistemas cuánticos en el mismo sentido que los sistemas microscópicos— para que provoquen que la función de onda experimente un salto tal. Así pues, si se pretende que la teoría sea algo más que un instrumento para hacer predicciones, ésta debe ser modificada para dar cuenta de la dinámica de los sistemas cuánticos sin apelar al misterioso concepto de *medición*.

⁶⁰ John S. Bell es reconocido por sus aportes acerca de la naturaleza del enredamiento cuántico y, en especial, por el llamado Teorema de Bell (Bell, 1964) con el que establece que las predicciones de la teoría cuántica implican inevitablemente *no-localidad* —una de las características distintivas y más sorprendentes de la teoría cuántica, ya que parece suponer velocidades superluminales y una “espeluznante acción a distancia”—.

Tim Maudlin⁶¹ hace una reconstrucción del problema de la medición que resulta muy útil para entender de dónde proviene la motivación para las diferentes “interpretaciones” de la mecánica cuántica. Siguiendo a Maudlin (1995, pág. 7), una manera de entender el problema de la medición consiste en reconocer que las siguientes tres afirmaciones son en conjunto incompatibles:

- i. La función de onda de un sistema es completa, es decir, la función de onda específica (directa o indirectamente) todas las propiedades físicas de un sistema.
- ii. La función de onda siempre evoluciona de acuerdo a una ecuación dinámica lineal (por ejemplo, la ecuación de Schrödinger).
- iii. Las mediciones sobre sistemas cuánticos siempre tienen resultados definidos.

Si nos fijamos en la descripción que he hecho más arriba de la mecánica cuántica estándar, puede observarse que para poder sostener i. y iii., la teoría debe comprometerse con la negación de ii., es decir, sostener que la función de onda no siempre evoluciona de acuerdo con una ecuación dinámica lineal. De esto se da cuenta en la interpretación estándar estipulando que cuando hay una medición, la función de onda “colapsa” —lo que corresponde a un proceso no-lineal—. El problema, como ya he mencionado, es que dicho proceso no está claramente definido dentro de la teoría. Al ser la mecánica cuántica una teoría física fundamental, se supone que, en última instancia, todos los objetos y procesos físicos han de tener una descripción en sus términos. Los aparatos de medición —así como los entes que observan y hacen uso de dichos aparatos— son, claramente, objetos físicos; por lo tanto, la mecánica cuántica debería también dar cuenta de ellos.

⁶¹ En el capítulo anterior se estudia la propuesta metafísica *primitivista* de Tim Maudlin con respecto a las leyes de la naturaleza, así como la crítica que hace a la superveniencia humeana partiendo de la mecánica cuántica.

Cuando la mecánica cuántica estándar asume que la dinámica de un sistema físico depende, en un momento dado, de que éste sea *medido* o no, debería explicar también lo que sucede en el aparato de medición: cómo se acopla o cómo interactúa con el sistema objeto de la observación. Técnicamente, con la teoría estándar se puede describir lo que sucede en dicha interacción, la cuestión es que, si se toma a los aparatos de medición como sistemas cuánticos, el resultado es la predicción de superposiciones macroscópicas, lo que contradice lo observado en el laboratorio —nunca vemos al gato en superposición de estar vivo y muerto, ni siquiera tenemos una idea de en qué consistiría una observación tal—. Por esta razón es que en el formalismo estándar se introducen el postulado del colapso y la regla de Born: porque con ellos se pueden recuperar los resultados empíricos. Pero la introducción de tal postulado no está conceptualmente bien justificada y salva las apariencias sólo desde un punto de vista instrumental. Con esto último no pretendo sentar una posición dentro del debate filosófico sobre realismo científico —es claro que puede haber buenas razones para asumir un instrumentalismo en esa discusión—. Lo que quiero señalar es que, a pesar de que la mecánica cuántica estándar recupera los resultados empíricos con la introducción del postulado del colapso y la regla de Born, de una teoría científica se espera más que adecuación empírica: se espera, entre otras cosas, consistencia, y eso es algo que no tiene la mecánica cuántica estándar al no plantear un criterio objetivo acerca de la medición.

Una teoría alternativa que tenga como objetivo resolver el problema de la medición asumirá la negación de alguno de los tres enunciados que señala Maudlin como mutuamente incompatibles y deberá dar una explicación satisfactoria de lo que ocurre en ese punto y de cómo se salvan los resultados empíricos. Las tres interpretaciones que mencioné al inicio de esta sección —las más importantes dentro del debate actual— pueden ser provechosamente presentadas bajo este marco, como veremos a continuación.

3. Interpretaciones de la mecánica cuántica

3.1. *Mecánica bohmiana*

Al negar el enunciado i. se tiene que *la función de onda no es completa*, es decir, para especificar completamente el estado físico de un sistema se necesita algo más que la función de onda. Se necesita identificar alguna otra variable que complemente la descripción y dé cuenta de aquello de lo que no está dando cuenta la interpretación estándar. Es por esto que a las teorías que niegan i. se les conoce como *teorías de variables ocultas*: porque ponen de manifiesto que hay una o más variables que han estado ocultas para la mecánica cuántica estándar y que es allí donde radica el problema que ésta enfrenta. La *mecánica bohmiana* es una teoría alternativa en este sentido.

En particular, la mecánica bohmiana afirma que además de la función de onda del sistema, las posiciones de las partículas que lo conforman son parámetros fundamentales de los que no se puede prescindir en la descripción de su estado físico. Esta teoría asume una ontología de partículas con posiciones definidas en todo momento. Al igual que la evolución de la función de onda, la evolución de las posiciones de las partículas es continua y determinista, lo que contrasta con la dinámica que supone el postulado del colapso de la interpretación estándar, que es discontinua e indeterminista.

Así pues, en esta teoría, la especificación del estado físico de un sistema cuántico se hace a partir de dos elementos: la función de onda del sistema y la posición de cada una de las partículas que lo conforman. Siguiendo esta idea, se consideran dos leyes dinámicas deterministas: la *ecuación de Schrödinger*, que describe la evolución de la función de onda, y la *ecuación guía*, que describe la evolución de las posiciones de las partículas.

Una forma típica de escribir la ecuación guía es la siguiente:

$$(4) \quad \frac{d\mathbf{Q}_k}{dt} = \frac{\hbar}{m_k} \operatorname{Im} \frac{\Psi^* \nabla_k \Psi}{\Psi^* \Psi} (\mathbf{Q}_1, \dots, \mathbf{Q}_N)$$

Donde N es el número total de partículas del sistema; k es una de las N partículas; \mathbf{Q}_i representa la posición de la partícula i y Ψ es la función de onda del sistema. Como puede verse, aunque la ecuación guía tiene como uno de sus parámetros a la función de onda, la posición de la partícula k no depende de ella exclusivamente, sino que depende también de las posiciones de las N partículas que conforman el sistema. Esto último implica que la mecánica bohmiana es una teoría física *explícitamente* no-local⁶².

Por otra parte, la mecánica bohmiana mantiene las afirmaciones ii. y iii. de la terna de Maudlin: la función de onda siempre evoluciona de acuerdo a Schrödinger y las mediciones siempre tienen resultados definidos —porque las posiciones de las partículas son siempre definidas de acuerdo con la ecuación guía y, aunque la propiedad medida no sea la posición, las partículas que componen los instrumentos de medición tienen todas posiciones definidas—.

Ahora bien, estrictamente hablando, según la teoría bohmiana, el único sistema genuinamente cuántico es el universo en su totalidad. Por esta razón, no es posible describir sistemas cuánticos aislados del entorno: lo que sucede en el laboratorio depende irremediamente de lo que sucede hasta con la partícula más remota del universo. Lo que esto implica es que, a pesar de tener una teoría determinista, no es posible hacer predicciones deterministas acerca de los subsistemas cuánticos que construimos en el laboratorio. No tenemos toda la información necesaria para poner a correr las ecuaciones y obtener un resultado

⁶² La posición de una partícula depende de las posiciones de todas las demás partículas, independientemente de qué tan lejos se encuentren entre sí; un cambio en la posición de una partícula afecta *instantáneamente* a todas las demás, es a este efecto a lo que se le conoce como *no-localidad*.

único sobre el estado físico del universo. ¡No somos el demonio de Laplace! Lo máximo a lo que podemos aspirar es a hacer predicciones probabilísticas sobre resultados de experimentos.

Como había dicho, dado el éxito de la mecánica cuántica estándar, se espera que cualquier teoría alternativa pueda dar cuenta, al menos, de los mismos resultados exitosos que ésta, requisito que cumple la mecánica bohmiana. La cuestión acerca de cómo recupera la teoría bohmiana las mismas predicciones probabilísticas de la mecánica cuántica estándar depende de consideraciones acerca del inicio del universo. Si la distribución inicial de las partículas satisface la distribución estadística $|\psi(x)|^2$, la ecuación guía garantiza que dicha distribución se mantenga a través del tiempo y que las observaciones que hacemos se comporten de acuerdo con la regla de Born.⁶³

Uno de los principales problemas que se suelen señalar con respecto a la mecánica bohmiana tiene que ver, precisamente, con el hecho de que el formalismo implica que el universo tiene una naturaleza no-local. Es cierto, como ya vimos, que la mecánica bohmiana abraza abiertamente la no-localidad en su formalismo, pero eso no quiere decir que sea la única teoría cuántica que involucra no-localidad.

De hecho, el problema de la no-localidad se plantea inicialmente en contra de la mecánica cuántica estándar. En 1935 Einstein, Podolsky, & Rosen, en el famoso artículo *Can Quantum Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?* (1935), recurren a un experimento mental de enredamiento cuántico —muy similar al que mencioné hacia el final de la sección 1.2. del presente capítulo— para argumentar en contra de la teoría cuántica. En términos muy generales, el argumento conocido como “EPR” —por las iniciales de sus autores—, parte de la premisa de que la realidad física es local, es decir, la realidad física no admite acción a distancia. Dado que las predicciones de la

⁶³ Ver (Dürr, Goldstein, & Zanghì, 1992).

mecánica cuántica estándar parecen implicar no-localidad —transmisión instantánea de información (lo que está claramente en contra de la teoría de la relatividad)—, la conclusión es que la descripción de la realidad física que se hace a partir de la mecánica cuántica estándar no es completa: falta algo que la complementa para que no viole el principio de localidad.

El argumento EPR inaugura una discusión que ha sido central dentro de los estudios sobre fundamentos de la mecánica cuántica. Un episodio particularmente importante dentro de esta historia ocurre en 1964, cuando el físico John Bell publica un artículo en el que demuestra que las predicciones de la mecánica cuántica estándar implican inevitablemente no-localidad, es decir, ninguna teoría de *un solo mundo*⁶⁴ que dé cuenta de las mismas predicciones de las que da cuenta la mecánica cuántica estándar puede ser local. Respondiendo a EPR: no hay manera de complementar la teoría cuántica estándar para obtener una teoría cuántica compatible con localidad.

Así pues, la crítica contra mecánica bohmiana que recurre al señalamiento de no-localidad, no resulta particularmente relevante, teniendo en cuenta que no es una característica exclusiva de esta teoría, sino que, como demostró Bell, parece ser inevitable para cualquier teoría cuántica que dé cuenta de las mismas predicciones de resultados definidos de las que da cuenta la mecánica cuántica estándar.

Otra de las críticas más comunes en contra de la mecánica bohmiana es que la postulación de la *ecuación guía* viola el principio de parsimonia y hace a la teoría muy complicada, o poco elegante, en comparación con el formalismo de la mecánica cuántica estándar.⁶⁵ Si partimos de la idea de que ambas teorías hacen exactamente las mismas predicciones observables, resulta sensato pensar

⁶⁴ Más adelante en este capítulo se habla sobre interpretaciones de la mecánica cuántica de “muchos mundos”.

⁶⁵ Ver (Goldstein S., 2017)

que postular una ecuación como la ecuación guía parece introducir una complicación matemática innecesaria. Pero si sopesamos ambas teorías a la luz de su verosimilitud frente al problema de la medición, me parece claro que la “sencillez” de la teoría estándar no compensa su imprecisión conceptual y que, al menos de momento, vale la pena considerar seriamente la posibilidad de adoptar las leyes y ontología de la mecánica bohmiana. Con respecto a la acusación de violación del principio de parsimonia, aplazaré la discusión para más adelante, cuando pase a analizar la posible interpretación metafísica de las distintas teorías sobre la mesa.

La última objeción que quiero mencionar con respecto a la mecánica bohmiana es aquella que señala su incompatibilidad con la teoría de la relatividad. El problema radica en que la no-localidad de la mecánica bohmiana asume un marco de referencia privilegiado —un estándar de simultaneidad— que habría que imponer o introducir en la teoría de la relatividad especial. Mientras que la mecánica cuántica estándar tiene un correlato relativista, a saber, la *teoría cuántica de campos*, los esfuerzos por desarrollar una versión relativista de la mecánica bohmiana aún no concluyen en una teoría concreta.

3.2. Colapso objetivo: GRW

Si se niega el enunciado ii., se tiene que *la función de onda no siempre evoluciona de acuerdo con una ecuación lineal* como la ecuación de Schrödinger. Como mencioné antes, éste es el caso de la mecánica cuántica estándar. Recordemos que en la interpretación estándar la función de onda de un sistema cuántico generalmente evoluciona de acuerdo a Schrödinger, pero en el momento en el que se realiza una medición, ocurre un proceso que obliga al sistema a colapsar en un eigenestado de la propiedad medida u observada. Es decir, la función de onda generalmente, pero *no siempre*, evoluciona de acuerdo a la ecuación de Schrödinger. Las interpretaciones de *colapso objetivo* corresponden a teorías alternativas en este sentido. A diferencia del proceso de colapso

postulado por la mecánica cuántica estándar, que depende de la acción de algo externo —ya sea un ser consciente o un aparato de medición—, el proceso de colapso objetivo depende de características propias de los sistemas cuánticos.

La interpretación conocida como GRW (Ghirardi, Rimini, & Weber, 1986) fue la primera teoría de colapso objetivo correspondiente al modelo conocido como QMSL (Quantum Mechanics with Spontaneous Localizations) y es, también, una de las más difundidas. Aunque existen otras teorías de colapso objetivo⁶⁶, el estudio de GRW será suficiente para los objetivos de la presente investigación.

La idea de GRW es que la función de onda de los sistemas cuánticos generalmente evoluciona de acuerdo con la ecuación de Schrödinger, pero que, además, existe una predisposición objetiva de los componentes elementales del sistema a entrar en un proceso estocástico de localización espontánea, un proceso de colapso objetivo⁶⁷. La función de onda de una partícula aislada tiene una probabilidad objetiva de colapsar extremadamente pequeña, por lo que podría permanecer en un estado de superposición durante muchísimo tiempo —cientos de millones de años—. Pero un sistema macroscópico, al estar compuesto por una cantidad considerablemente alta de partículas —del orden de 10^{23} —, tiene una probabilidad altísima de colapsar en corto tiempo.

Así pues, cuando se realiza en el laboratorio una medición sobre un sistema microscópico, se tiene como resultado un valor definido, no porque la observación o la medición constituyan procesos físicos especiales que provocan el colapso del sistema, sino porque el sistema compuesto “aparato de medición + sistema microscópico” tiene una probabilidad de colapsar lo suficientemente alta como para que colapse casi inmediatamente, con lo que la afirmación iii. se

⁶⁶ Ver (Ghirardi G., 2018)

⁶⁷ La motivación para defender que la base privilegiada para el colapso es la base de posiciones tiene que ver con el hecho de que, en general, las propiedades físicas pueden correlacionarse con las posiciones de las partículas de un apuntador macroscópico (por ejemplo, cuando nos paramos en una báscula para averiguar nuestro “peso”, lo que observamos es la posición de un puntero sobre una escala).

sostiene. Por otra parte, la afirmación i. también se sigue sosteniendo: la función de onda da cuenta completa del estado físico del sistema en todo momento.

Matemáticamente, el proceso de colapso propuesto por GRW consiste en una multiplicación de la función de onda por una gaussiana estrecha que se extiende infinitamente alrededor de un punto⁶⁸. El punto de localización es aleatorio con una distribución de probabilidad dada por el cuadrado de la amplitud de la función de onda antes del colapso $|\psi(x)|^2$, lo que asegura que las predicciones probabilistas coincidan, hasta cierto punto, con las de la mecánica cuántica estándar. Ahora bien, el hecho de que la función de onda se multiplique por una gaussiana hace que el colapso no sea estricto. La función de onda después del proceso de colapso espontáneo no termina perfectamente localizada, sino que tiene una amplitud muy alta en un punto y amplitudes que tienden a cero, pero que no son nulas, al alejarse de ese punto, es decir, en las colas de la gaussiana. Entonces, ¿por qué no observamos superposiciones?

Primero que todo hay que considerar que, para salvar las apariencias, la teoría ha “escogido” minuciosamente el valor de las dos nuevas constante de la naturaleza que postula, de manera que las predicciones de GRW coinciden con las observaciones realizadas hasta el momento. Tales constantes son la frecuencia media de localización de una partícula y el ancho de la gaussiana por la cual se multiplica la función de onda al momento del colapso. Dado que la localización ocurre lo suficientemente rápido y el ancho de la gaussiana es lo suficientemente estrecho, lo que observaremos en el laboratorio será un colapso “instantáneo” y una localización “definida”, pues nuestros aparatos de medición no alcanzan a registrar lo que quede por fuera de eso.

Ahora bien, para muchos críticos de GRW, lo anterior no es suficiente para explicar por qué no vemos superposiciones. Si partimos de la interpretación

⁶⁸ Los teóricos de GRW tienen razones físicas fuertes —que no es necesario abordar en este trabajo— para que la función considerada sea una gaussiana en lugar de una función delta de Dirac.

estadística de la función de onda y sabemos que después del colapso la función de onda es diferente de cero en todo el espacio, eso querría decir que hay una probabilidad, aunque sea muy muy pequeña, de observar a la partícula en cualquier punto del espacio diferente del centro de la gaussiana. A esta situación se le conoce en la literatura como el *problema de las colas*. Que el problema de las colas sea, de hecho, un problema tiene que ver de manera importante con la asunción de una interpretación estadística de la función de onda. Si se asume una interpretación alternativa de la función de onda, es posible llegar a dar cuenta de lo que está sucediendo sin caer en un problema como el señalado por los detractores de GRW.

Una de las interpretaciones con las que se puede llegar a dar respuesta al anterior problema es la que propone lo que se conoce como una “ontología de densidad de masa” (Ghirardi, Grassi, & Benatti, 1995). Esta propuesta consiste, a grandes rasgos, en asumir una ontología que permite interpretar a la función de onda como un elemento que determina a cada instante la *densidad de masa* en el espacio tridimensional, es decir, en el espacio en el que experimentamos y hacemos observaciones. Así, por ejemplo, supongamos que la función de onda de una partícula, después de la localización, espontánea tiene una amplitud muy alta en el punto x —el centro de la gaussiana— y amplitudes muy pequeñas, pero no nulas, en el resto del espacio. Lo que esto quiere decir, según la ontología propuesta, es que en el punto x hay una gran densidad de masa y en el resto del espacio hay densidades de masa muy pequeñas, lo cual explica por qué percibimos a la partícula en el punto x y no en ningún otro punto: porque ni nuestros sentidos ni nuestros aparatos de medición tienen la sensibilidad suficiente para percibir densidades de masa tan pequeñas. Técnicamente, entonces, en esta interpretación de GRW, la partícula —o lo que interpretamos como una partícula— existe en todo el espacio, pero la mayor parte de su masa está concentrada en un punto y eso es lo que observamos.

Esta propuesta, como acabamos de ver, asume compromisos metafísicos específicos que pueden llegar a ser relevantes a la hora de analizar la supuesta incompatibilidad que existe entre la mecánica cuántica y la superveniencia humeana —objetivo último del presente trabajo—. Su rival más directo es la que se conoce como “ontología de *flashes*” (Bell, *Are there quantum jumps?*, 1987) (Tumulka, 2006), una propuesta metafísica que, como la anterior, pretende dar cuenta de la relación entre la función de onda con colapso objetivo y nuestra experiencia del espacio tridimensional. Como he mencionado antes, cada localización espontánea en GRW es un evento ubicado de manera definida en un punto del espacio-tiempo. Cada uno de tales eventos es lo que en esta interpretación se conoce como un “*flash*”. La función de onda, en este caso, se interpreta estadísticamente como una medida de la probabilidad de distribución de *flashes*. Un objeto perceptible se entiende como una “constelación” con una alta densidad de *flashes*. Si bien la función de onda, al ser diferente de cero en todo el espacio, admite la posibilidad de que algún *flash* ocurra lejos del punto de localización, la probabilidad es tan pequeña que, dada la enorme cantidad de *flashes* que componen un objeto, tales casos pasarán desapercibidos.

La ontología de *flashes*, entonces, retoma una interpretación estadística de la función de onda, mientras la ontología de densidad de masa la entiende como un elemento no-azaroso que determina cómo es el mundo. Eso no quiere decir que esta última interpretación sea determinista, el carácter indeterminista de GRW se mantiene en la dinámica de la función de onda, más no en la interpretación sincrónica que hacemos de ella. Más adelante sopesaré estas posibles interpretaciones al intentar solucionar el problema de la superveniencia humeana.

Ahora bien, el problema de las colas no es el único problema al que se enfrenta GRW. Como ya anunciaba el teorema de Bell, el problema de la no-localidad también se manifiesta en esta teoría. Al igual que el colapso en la interpretación estándar, el colapso objetivo en GRW es un proceso que ocurre

simultáneamente en todo el espacio, lo que lleva a una incompatibilidad con la teoría de la relatividad. En este sentido, se ha defendido que la interpretación de ontología de *flashes* abre una posibilidad de llegar a reconciliar GRW con la teoría de la relatividad especial, aunque, por el momento, no existe una propuesta satisfactoria (Ghirardi G., 2018).

Otro problema que se le ha planteado a GRW tiene que ver con el hecho de que la localización espontánea no ocurre exactamente en el momento de la medición, sino que es un proceso aleatorio cuyo tiempo probable de ocurrencia depende del tamaño del sistema. Para los casos de aparatos de medición macroscópicos, el colapso ocurre casi inmediatamente, pero cabe la posibilidad de pensar en aparatos de medición microscópicos para los cuales la cantidad de partículas involucradas hasta que un número perceptible de fotones alcanza un ojo humano sería muy pequeña y, por tanto, el tiempo de ocurrencia del colapso sería considerablemente alto, llevándonos de nuevo al problema de por qué no percibimos superposiciones. La respuesta que se ha dado (Aicardi, Borsellino, Ghirardi, & Grassi, 1991) señala que si bien estas consideraciones con respecto a las predicciones de la teoría son correctas, una observación no termina en el momento en el que los fotones llegan al ojo, sino que hay que tener en cuenta el proceso de transmisión de la señal hasta el cerebro y, en ese recorrido, se estima la participación de un número suficientemente alto de partículas como para asegurar la ocurrencia de una localización espontánea.

Lo anterior tiene que ver, de manera importante, con el hecho de que, aunque GRW recupera las predicciones de la mecánica cuántica estándar que han sido exitosas hasta el momento, técnicamente las predicciones de las dos teorías no son las mismas y cabría la posibilidad de plantear experimentos cruciales que permitieran elegir entre una y otra. Pero hasta que eso no suceda, podemos seguir considerándolas como dos teorías alternativas sobre el mismo fenómeno.

3.3. *Muchos mundos*

Por último, las *interpretaciones tipo Everett* —entre las que se encuentra la interpretación conocida como *muchos mundos*— se comprometen con una negación del enunciado iii., es decir, defienden que las mediciones sobre sistemas cuánticos no siempre tienen valores definidos. La idea de este tipo de interpretación es, entonces, que i. la función de onda describe por completo el estado físico de los sistemas cuánticos y ii. la función de onda siempre evoluciona con base en la ecuación de Schrödinger, así pues, las teorías de este tipo son teorías deterministas. Dada la linealidad de la ecuación de Schrödinger, si se realiza una medición sobre un sistema en superposición, el resultado debe ser una superposición; el hecho de que a nosotros como observadores nos *parezca* que siempre se obtiene un valor definido es precisamente eso: una apariencia.

Para las interpretaciones tipo Everett, que un sistema cuántico tenga una función de onda en superposición implica que cada uno de los estados componentes de la superposición existe simultáneamente —el gato está vivo y, simultáneamente, el gato está muerto—. Cuando se realiza una medición sobre un sistema en superposición, el resultado es que el aparato de medición marca al mismo tiempo todos los valores definidos para cada uno de los estados superpuestos. Entonces, ¿por qué nos parece que la medición arrojó un único resultado definido?

La propuesta de *muchos mundos*⁶⁹ —la interpretación tipo Everett más extendida actualmente— afirma que lo que sucede cuando dos sistemas cuánticos interactúan —en una medición, por ejemplo— es que el universo se “divide” en tantas ramas como estados en superposición tenga la función de onda del sistema compuesto. Lo que debe quedar claro es que no hay nada similar a un colapso en tal interacción: la función de onda del sistema compuesto surge y

⁶⁹ La primera formulación de la interpretación de *muchos mundos* se debe a (DeWitt, 1970). Para formulaciones más recientes ver (Saunders, Barrett, Kent, & Wallace, 2010)

evoluciona linealmente de acuerdo a Schrödinger a partir de las funciones de onda de los sistemas iniciales —sistema observado, aparato de medición, observador—. La medición no es un proceso de una naturaleza particular que provoque la “ramificación” del universo, cualquier interacción —acoplamiento— entre sistemas en superposición genera sistemas compuestos en superposición. Una vez que el sistema se ha acoplado, todas las ramas existen al mismo tiempo. Como el observador también participa de esa ramificación, entonces, cada una de sus versiones en esas ramas —en esos “mundos”— observa el valor definido en el aparato de medición correspondiente a la rama en la que se encuentra y por eso *nos parece* que las mediciones arrojan siempre valores definidos.

Una de las primeras preocupaciones filosóficas con respecto a la teoría de *muchos mundos* es que parece multiplicar exageradamente los entes: ya no hay un solo gato, sino dos, y cada vez hay más y más ramificaciones, más y más mundos, más y más entes. La parsimonia ontológica —que resulta de observar el principio de la navaja de Ockham— es una de las primeras cualidades a tener en cuenta cuando se comparan tesis metafísicas en disputa. Si cada uno de los mundos producto de una ramificación son entes independientes metafísicamente básicos, las teorías tipo Everett estarían evidentemente en desventaja con respecto a las otras teorías cuánticas, al menos desde este punto de vista.

Por otra parte, se ha señalado que la multiplicación de los entes también puede llegar a representar un problema a nivel de la física, pues cabe pensar que el proceso de ramificación viola los principios de conservación de la materia y la energía. Si después de la ramificación hay dos gatos en lugar de uno, entonces la materia y la energía no se están conservando como sostienen los principios mencionados.

Si bien Bryce DeWitt, quien propuso por primera vez la interpretación de *muchos mundos* (DeWitt, 1970), parecía estar pensando en los mundos producto de las ramificaciones como entidades básicas, actualmente, algunos defensores de la propuesta han intentado dar respuesta al problema de la multiplicación de

los entes reinterpretando metafísicamente la teoría (Wallace D., 2010). La idea es que la función de onda —el estado cuántico— es metafísicamente fundamental y los mundos son entidades emergentes que toman forma como subestructuras de dicha base metafísica. Así pues, aunque los mundos son reales, no son entidades extra, las entidades no se están multiplicando y *muchos mundos* no está yendo en contra del principio de la navaja de Ockham. Que lo anterior sea una solución efectiva dependerá de lo que signifique que la función de onda sea metafísicamente fundamental y la aceptabilidad de sus implicaciones. Sobre realismo de la función de onda hablaré en el siguiente capítulo.

Otro problema que se le plantea a la interpretación de *muchos mundos* es el que se conoce como el *problema de la base privilegiada*. Como ya vimos, según el formalismo cuántico, una misma función de onda puede ser representada como la superposición de estados definidos en diferentes bases vectoriales (que representan diferentes propiedades). El problema de la base privilegiada tiene que ver con el hecho que la teoría de *muchos mundos* no plantea un criterio objetivo de cómo se fija —o cómo se “elige”— la base en la que se ramificará el universo como resultado de una interacción. Si no hay una base privilegiada, no es posible identificar efectivamente los “mundos” de los que habla la teoría. Los defensores de *muchos mundos* han intentado justificar la elección de la base de posiciones como base privilegiada, pero el hecho de que esta elección parezca hacerse de manera *ad hoc*, es algo que no termina de convencer.

En relación con los resultados experimentales, las teorías tipo Everett, incluida *muchos mundos*, enfrentan un problema particularmente grave y es el de cómo se recuperan las probabilidades de la mecánica cuántica estándar —tan exitosamente corroboradas—. Ya hemos visto que las teorías tipo Everett son teorías deterministas, a pesar de eso, éstas no permiten hacer predicciones sobre lo que de hecho observamos en el laboratorio. Según las interpretaciones tipo Everett, cuando se realiza una medición sobre un sistema, todos los posibles resultados ocurren simultáneamente, esto quiere decir que todos los posibles

resultados tienen una probabilidad igual a 1 de ocurrir. Pero cuando realizamos mediciones en el laboratorio lo que sucede es que no observamos superposiciones, sino que obtenemos resultados definidos. Cada uno de esos resultados definidos los observamos, además, con las frecuencias predichas por la mecánica cuántica estándar. Si, según las teorías tipo Everett, en toda medición todos los resultados ocurren *necesariamente*, ¿por qué las observaciones tienden a mantener las proporciones predichas por el formalismo estándar?

Son muchas y diversas las aproximaciones que los teóricos de las interpretaciones tipo Everett han intentado dar al problema de las probabilidades⁷⁰. En particular, se han enfocado en tratar de explicar cómo podrían interpretarse las probabilidades para estas teorías deterministas. Sin embargo, eso no es suficiente, pues, hasta el momento, ninguna logra explicar por qué son justo las frecuencias predichas por la regla de Born, y no otras, las que obtenemos en los experimentos.

4. Sumario

En el presente capítulo se han estudiado los conceptos y postulados fundamentales de la teoría de la mecánica cuántica, lo cual servirá como base para abordar el problema de la superveniencia humeana desde una perspectiva naturalista. También hemos analizado el problema de la medición y las teorías alternativas más relevantes —inadecuadamente llamadas *interpretaciones* de la mecánica cuántica— que se han planteado para solucionarlo, a saber: mecánica bohmiana, GRW y *muchos mundos*. Con respecto a esto, me he concentrado no sólo en estudiar los supuestos de dichas teorías, sino en analizar algunos de los problemas más importantes que se les señala a cada una de ellas, con el objetivo de ir reduciendo la base científica de la que partiré.

⁷⁰ (Wallace D., 2003), (Saunders & Wallace, 2008), (Vaidman, 2012).

Si bien cada una de las tres teorías cuánticas alternativas estudiadas se enfrenta a distintos problemas —algunos más graves que otros—, considero que el problema más serio de todos es aquel que se le señala a la teoría de *muchos mundos* con respecto a su incapacidad para dar cuenta de por qué los resultados experimentales coinciden con las probabilidades de la mecánica cuántica estándar. Como vimos, aunque los defensores de *muchos mundos* han intentado abordar este problema, sus respuestas se han concentrado principalmente en hablar de interpretaciones de la probabilidad que en explicar por qué los resultados experimentales son los que son dada su teoría. Ahora bien, tanto si se asume una postura realista como instrumentalista frente a la ciencia, una de las características indispensables de una teoría científica tiene que ver con su capacidad de dar cuenta de los fenómenos observables. Si la teoría de *muchos mundos* no puede dar cuenta de esto, no encuentro razones —al menos de momento— para tomarla en cuenta como una alternativa seria a la mecánica cuántica estándar. Así pues, en general, no será tenida en cuenta en los capítulos siguientes de este trabajo.

Por su parte, mecánica bohmiana y GRW, a pesar de no estar exentas de algunos problemas, pueden considerarse teorías científicas conceptualmente bien definidas, que solucionan el problema de la medición y que exhiben virtudes teóricas importantes como simplicidad, elegancia y poder explicativo. Además, como vimos, para ambas teorías se han propuesto ontologías específicas que pueden servir como punto de partida para el análisis del problema que me interesa.

Teniendo en cuenta que el objetivo último del presente trabajo es plantear una solución al problema que los resultados de la mecánica cuántica le imponen a la tesis metafísica de superveniencia humeana, el siguiente paso metodológico debe ser identificar las posibles interpretaciones metafísicas de dicha teoría, con miras a encontrar aquella o aquellas que puedan convivir sin contradicciones con

los supuestos metafísicos de la tesis de superveniencia humeana. Esto es lo que me propongo hacer en el capítulo siguiente.

CAPÍTULO III

METAFÍSICA DE LA FUNCIÓN DE ONDA

Una de las principales preocupaciones filosóficas con respecto a la teoría de la mecánica cuántica tiene que ver con los compromisos ontológicos que acarrea la adhesión a dicha teoría. En particular, ha sido alrededor del concepto de *función de onda* que se ha concentrado la discusión en este sentido. Como vimos en el capítulo anterior, dadas sus características matemáticas, la función de onda se considera la mejor forma de representar los estados físicos de sistemas cuánticos, pero ¿habría alguna razón para considerarla como representando algo más que una entidad matemática?, ¿hasta qué punto podría afirmarse que lo que se supone que se describe a través de ella corresponde a una situación física real? En el presente capítulo reviso las principales propuestas metafísicas con las actualmente que se busca dar respuesta a la pregunta sobre el estatus ontológico de la función de onda⁷¹; esto con el objetivo de delimitar un campo de posibilidad que se ajuste a mi compromiso naturalista. Este ejercicio me permitirá identificar, en el siguiente capítulo, si alguna de estas propuestas es viable como punto de partida para resolver el problema al que se enfrenta la tesis de superveniencia humeana.

⁷¹ De ahora en adelante —y en concordancia con la forma en la que se hace generalmente en la literatura sobre el tema—, mientras no se especifique lo contrario y el contexto permita que no haya confusión, el término ‘función de onda’ se utiliza indistintamente para hablar i) de la función de onda como objeto matemático y ii) del posible elemento de realidad representado por dicho objeto matemático.

1. Realismo de la función de onda

Antes que nada, es importante recordar que uno de los supuestos de los que parto en el presente trabajo es la tesis del realismo científico, es decir, en términos generales, que las teorías científicas buscan, por medio de sus postulados, decir algo verdadero acerca de la realidad más allá de los fenómenos y que, de hecho, las teorías científicas exitosas están diciendo algo verdadero con respecto a la realidad. Así pues, si partimos del hecho de que la mecánica cuántica es una teoría ampliamente exitosa, el realismo científico nos lleva a concluir que dicha teoría está describiendo correctamente algún aspecto de la realidad⁷². Ese supuesto es relevante porque, de no ser así, el problema que la mecánica cuántica le plantea a la tesis de superveniencia humeana quedaría fácilmente desvirtuado y no tendría ningún sentido meternos en esta discusión.

Ahora bien, una cosa es ser realista de la mecánica cuántica y otra ser realista de la función de onda. Para hacer una interpretación metafísica de una teoría científica es necesario clasificar los elementos que dicha teoría pretende que refieran a objetos reales y relaciones, y aquellos que son simples instrumentos o herramientas matemáticas. Una vez hecho esto, lo que nos diría el realismo científico —el más simple, directo e ingenuo de los realismos científicos— es que: (1) si la interpretación metafísica de la teoría me dice que hay un cierto conjunto de objetos D que se relacionan de la manera R ; y (2) es el caso que la teoría es exitosa; entonces, (3) podemos concluir que *realmente* existe un dominio de objetos D que se relacionan según R .

Así pues, ser realistas de la mecánica cuántica no nos compromete inmediatamente con un realismo de la función de onda. Primero tenemos que

⁷² Como mencioné previamente, la discusión filosófica acerca de qué es aquello que debe asumirse como *real* a partir de las teorías científicas exitosas es algo que excede los límites de este trabajo, por lo que nos quedaremos con esta definición muy general de realismo científico, pero que levanta las intuiciones a partir de las cuales surge el problema de la supuesta incompatibilidad entre superveniencia humeana y mecánica cuántica.

identificar las posibles interpretaciones metafísicas de la teoría. Si la interpretación metafísica a la que nos adherimos asume que la función de onda es un objeto físico, entonces entraríamos a comprometernos con un realismo de la función de onda como objeto físico. Pero, en principio, es posible que haya interpretaciones en las que la función de onda sólo cumpla un papel instrumental o matemático, en esos casos, no nos veríamos obligados a asumir un realismo de la función de onda, incluso si somos realistas científicos. Lo que sigue, entonces, es evaluar qué tan pertinente es asumir a la función de onda como un elemento de realidad al hacer una interpretación metafísica de la mecánica cuántica.

Algunas interpretaciones antirrealistas de la función de onda consideran que ésta juega, simplemente, un papel epistemológico dentro de la teoría cuántica y que no hay razones para entenderla como representando parte de la ontología del mundo.

[El antirrealismo de la función de onda] está motivado, entre otras cosas, por el colapso del estado cuántico en la medición. Si el estado cuántico [—representado por la función de onda—] es un estado físico real, entonces el colapso es un proceso físico misterioso cuyo instante de ocurrencia preciso no está bien definido. (Pusey, Barrett, & Rudolph, 2012, pág. 475)

La idea de esta postura antirrealista, entonces, es que la función de onda representa cierta información que tenemos acerca de los sistemas cuánticos, pero que no corresponde directa ni completamente a la situación física particular que buscamos describir. Así, no hay nada de misterioso en el colapso de la función de onda durante la medición: simplemente debemos entender ese cambio abrupto en la función de onda como la incorporación de información nueva a nuestro sistema de creencias.

Si bien una postura como la anterior podría sacarnos de algunos de los aprietos a los que —como veremos— nos enfrenta considerar la función de onda como un elemento de realidad, existen razones fuertes para pensar que la función de onda es más que un elemento puramente epistémico. Matthew Pusey, Jonathan Barret y Terry Rudolph (PBR) (2012) toman como punto de partida el

supuesto básico del antirrealismo y utilizan una especie de argumento por reducción al absurdo para demostrar que tal postura es falsa:

Aquí presentamos un teorema de imposibilidad: si el estado cuántico simplemente representa información acerca del estado físico real de un sistema, entonces se obtienen predicciones experimentales que contradicen las predicciones de la mecánica cuántica. (Pusey, Barrett, & Rudolph, 2012, pág. 475)

A este teorema se le conoce actualmente como el *teorema PBR* y el artículo en el que se postula se ha convertido en un referente ineludible en la discusión filosófica sobre fundamentos de la mecánica cuántica.

Dando por sentado (1) “que un sistema *tiene* un «estado físico real»”, y (2) “que los sistemas que son preparados independientemente tienen estados físicos independientes” (Pusey, Barrett, & Rudolph, 2012, pág. 475), el teorema PBR lleva a la conclusión de que el supuesto antirrealista es falso. Dado el éxito predictivo de la mecánica cuántica, no sería racional aceptar una postura que nos lleva a una contradicción con las predicciones de dicha teoría. La función de onda, entonces, no representa simple información, sino que representa un elemento que corresponde a algo físicamente real.⁷³

Ahora bien, al decir que la función de onda representa algo físicamente real no se está diciendo nada acerca del tipo ontológico de ese elemento de realidad, es decir, no se está diciendo qué tipo de cosa es aquella que representa la función de onda. Ser realista de la función de onda puede hacerse desde diferentes consideraciones ontológicas, cada una de las cuales dependerá de cómo se interpreten y relacionen metafísicamente los demás elementos de la teoría. A pesar de esto —es decir, a pesar de no ser la única postura realista con respecto a la función de onda—, existe una postura particular a la que sus defensores han decidido llamar Realismo de la función de onda (Wave Function Realism, WFR).

⁷³ Para que PBR lleve a negar el antirrealismo de la función de onda es necesario aceptar los supuestos (1) y (2) mencionados en este párrafo. Si bien tales supuestos no suelen ser controvertidos, el antirrealista puede buscar rechazarlos para seguir sosteniendo su postura, como se discute en (Spekkens, 2015).

El principal defensor de dicha postura es David Z. Albert, quien considera que la función de onda es un ente físico que “vive” dentro de un espacio altamente dimensional (el espacio de configuración)⁷⁴, el cual, a pesar de no corresponder con el espacio tridimensional de nuestra experiencia inmediata, es un espacio físico real —no simplemente matemático— y, de hecho, es el espacio en el que fundamentalmente acaece todo lo que ocurre en el universo.

En palabras de Albert, su concepción metafísica de la función de onda es la siguiente:

El tipo de objetos físicos que son las funciones de onda, en esta manera de pensar, son (sencillamente) *campos* —lo que es decir que son el tipo de objetos cuyos estados se especifican especificando los valores de algún conjunto de números en cada punto de la arena en la que viven, el tipo de objetos cuyos estados se especifican (en este caso) especificando los valores de dos números (uno de los cuales es usualmente referido como una *amplitud* y el otro como una *fase*) en cada punto en el espacio de configuración del universo.

Los valores de la amplitud y de la fase son considerados (como con todos los campos) como propiedades intrínsecas de los puntos en el espacio altamente dimensional con los que están asociados. (Albert, 2013, pág. 53)

La idea, entonces, es que la naturaleza ontológica de la función de onda es del mismo tipo que la de los campos electromagnéticos —por ejemplo— y que, por lo tanto, es tan real como aquéllos, a pesar de que el espacio físico en el que se localiza no sea accesible para nosotros. Dado esto, que experimentemos el espacio físico como tridimensional resulta ser una *ilusión*, una *apariencia*,⁷⁵ pues el espacio físico real *fundamental* es el espacio de configuración 3N-dimensional en el que se desenvuelve la función de onda como campo.

Continúa Albert:

La cuestión particularmente urgente (de nuevo) es dónde están, en esta concepción, todas las mesas y sillas y edificios y personas. La cuestión particularmente urgente es cómo es posible que haya sucedido, en una concepción

⁷⁴ Ver sección 2.2. del presente trabajo.

⁷⁵ Esto no supone un eliminativismo de los objetos en el espacio tridimensional; sino que éstos existen como objetos emergentes —no fundamentales—.

como ésta, que nos parezca que hay *múltiples* partículas moviéndose en un espacio *tridimensional*. (Albert, 2013, pág. 54)

Nótese que, al considerar a la función de onda como un objeto físico fundamental, deja de tener sentido pensar la dimensionalidad del espacio que ésta habita como dependiente del número de partículas del universo. Técnicamente ya no hay partículas —al menos no con un estatus ontológico más fundamental que el de la función de onda— y, por lo mismo, el espacio en el que vive la función de onda no debe considerarse un *espacio de configuración*. Como vimos en el capítulo anterior, un espacio de configuración es un constructo matemático que sirve para condensar información acerca de localizaciones de múltiples partículas en un espacio de menor dimensionalidad. Si aceptamos que la base metafísica del mundo es la función de onda como campo que vive en un espacio físico altamente dimensional, no tiene sentido pensar que la dimensionalidad de ese espacio depende de un hecho metafísicamente secundario —o, como dice el mismo Albert, aparente— como la existencia de múltiples partículas. Así pues, aunque se hable de ese espacio físico como ‘espacio de configuración’ es necesario tener presente que no lo es en el sentido estricto del término.

Para Albert, si uno quiere ser realista con respecto a la mecánica cuántica, ésta es la forma más simple y directa de entender a la función de onda; la interpretación que se haga del papel que tal entidad física juega en el mundo dependerá de cómo se resuelva el problema de la medición. Un realista de la función de onda que se decida por una interpretación bohmiana de la mecánica cuántica defenderá que el mundo está compuesto por dos objetos físicos fundamentales: la función de onda universal y la partícula universal —una única partícula que vive en el espacio de configuración, en lugar de muchas partículas en el espacio tridimensional— (Albert, 1996). Por su parte, aquel que prefiera una interpretación de colapso objetivo o everettiana se comprometerá con una ontología del mundo que consta únicamente de un objeto físico, a saber, la función de onda universal.

En cualquier caso, lo que queda por explicar es cómo es que a partir de una ontología en la que el espacio físico fundamental es $3N$ -dimensional y el objeto físico fundamental que vive en ese espacio es un campo —la función de onda— surge una realidad fenoménica en la que hay objetos macroscópicos como mesas, gatos y personas, cuyas historias se desarrollan en un espacio aparentemente tridimensional. Como veremos, muchos piensan que no hay manera de dar cuenta satisfactoriamente de los objetos macroscópicos tridimensionales partiendo de la ontología propuesta por WFR, sin caer en consideraciones *ad hoc*. A continuación, revisaré algunas de las críticas a esta postura y las alternativas que sus representantes proponen para mantener una postura realista frente a la mecánica cuántica y la función de onda, sin la necesidad de sostener un realismo del espacio $3N$ -dimensional como el que defiende Albert.

2. Críticas y alternativas al realismo de la función de onda como campo en el espacio de configuración

Aunque la experiencia nos ha enseñado que las intuiciones son falibles, cuando se trata de teorizar acerca de la naturaleza última del mundo, no sólo es difícil dejar de lado aquello que el llamado “sentido común” nos presenta como obvio, sino que resulta metodológicamente sensato aferrarnos a ello tanto como sea posible, con el objetivo de mantener cierta consistencia dentro del conjunto de nuestros conocimientos. Con esto no quiero decir que las creencias derivadas de la intuición deban considerarse un elemento inamovible dentro del conjunto de nuestras creencias y que todo conocimiento científico y filosófico deba someterse a ellas, sino que éstas cumplen un papel metodológico importante en el proceso de desarrollo y elección de teorías y que sólo deben dejarse de lado

cuando exista evidencia suficiente para ello —de manera que se maximice la consistencia de nuestro conjunto de creencias—. ⁷⁶

Como mencioné en la introducción a este trabajo ⁷⁷, el conocimiento, tanto científico como filosófico, se construye no sólo a partir de la evidencia empírica, sino también de criterios pragmáticos que tomamos como base para postular y elegir entre teorías. La justificación para dichos criterios está dada, en gran medida, por intuiciones desde las cuales evaluamos la adecuación y verosimilitud de las explicaciones. Entre dos teorías empíricamente equivalentes que buscan dar cuenta del mismo fenómeno, ¿qué razones tendríamos para elegir aquella que resulta más lejana a nuestras intuiciones? Las intuiciones cumplen una función cohesiva para el conocimiento, dejarlas de lado nos despojaría de una herramienta fundamental para el proceso de teorización. Ser metafísicamente conservadores, es decir, aferrarnos tanto como sea posible a lo que nos dice la intuición, o el sentido común, es, entonces, un principio metodológico que deberíamos tener en mente a la hora de desarrollar teorías metafísicas.

Ahora bien, regresando a la cuestión sobre la naturaleza metafísica de la función de onda, resulta que todas las observaciones que hacemos del mundo en el que vivimos nos llevan a la conclusión de que éste es tridimensional —o 4-dimensional, si queremos tener en cuenta la dimensión temporal—. No tenemos evidencia empírica alguna que nos haga dudar de que el espacio en el que se encuentran nuestro cuerpo y los objetos con los que nos relacionamos, en el que suceden nuestras vidas y tienen lugar los experimentos que realizamos, no sea tridimensional. La intuición nos incita poderosamente a inferir que, dado que todas nuestras experiencias nos presentan al mundo como tridimensional, entonces el mundo tiene, efectivamente, tres dimensiones espaciales. La intuición

⁷⁶ Por ejemplo, aunque el sentido común podría decirnos que el sol gira alrededor de la Tierra, actualmente tenemos evidencia suficiente para deslegitimar esa intuición y, con base en ello, asumimos la creencia de que es la Tierra la que gira alrededor del sol.

⁷⁷ Página 11 y ss.

es, pues, en este sentido, el principal enemigo del realismo de la función de onda que asegura que la tridimensionalidad de nuestro mundo es una *mera ilusión*.

A continuación, reviso algunas propuestas alternativas que permitirían defender un realismo de la función de onda sin comprometernos con un realismo del espacio de configuración. Todas estas propuestas buscan mantener el espacio tridimensional como el espacio físico fundamental, sin dejar de lado las consideraciones sobre la pertinencia de entender a la función de onda como un elemento de realidad. En otras palabras, se busca una postura realista que no se comprometa con la idea de que la función de onda es un objeto físico en un espacio altamente dimensional, sino una alternativa en la que se le pueda dar un estatus metafísico a la función de onda como algo más que una simple herramienta matemática y, a la vez, se conserven las intuiciones más básicas que tenemos con respecto a la naturaleza metafísica de nuestro mundo.

2.1. La función de onda como ley de la naturaleza

Una de las principales propuestas alternativas a WFR consiste en entender a la función de onda como un elemento nomológico, es decir, como una ley de la naturaleza o como parte de una ley de la naturaleza. Esta propuesta ha sido desarrollada principalmente por Valia Allori, Detlef Dürr, Sheldon Goldstein, Roderich Tumulka y Nino Zanghì⁷⁸. Dado que el objetivo último de este trabajo tiene que ver con una postura particular con respecto al estatus metafísico de las leyes de la naturaleza, a saber, la tesis de superveniencia humeana, y su compatibilidad con la mecánica cuántica, las interpretaciones metafísicas que entienden a la función de onda como un elemento nomológico nos resultan de especial interés.

⁷⁸ (Dürr, Goldstein, & Zanghì, 1997), (Allori, Goldstein, Tumulka, & Zanghì, 2008), (Allori V., 2013), (Goldstein & Zanghì, 2013), entre otros.

La crítica de Allori (2013) en contra de WFR inicia con la cuestión que señalé anteriormente: si se va a sostener que el espacio físico fundamental es el espacio de configuración y que el objeto físico básico es la función de onda, el defensor de WFR está en la obligación de proveer una explicación de por qué parece que vivimos en un espacio tridimensional y de cómo se recuperan las apariencias de objetos macroscópicos en términos de la función de onda. Para desarrollar su argumento, Allori retoma la terminología de *imagen científica* e *imagen manifiesta* de Sellars (1971). Lo que se le exige, entonces, al realista de la función de onda es que reconcilie la *imagen científica*, es decir, la imagen del mundo que obtenemos de nuestras mejores teorías científicas, con la *imagen manifiesta*, la imagen que tenemos del mundo con base en nuestra experiencia.

Allori intenta mostrar que, contrario a lo que afirma WFR, la mecánica cuántica no es una teoría acerca de funciones de onda que viven en un espacio altamente dimensional, sino acerca de objetos que se encuentran en el espacio tridimensional. Una vez hayamos definido cuáles son estos objetos, se supone que no será difícil reconciliar la imagen científica con la imagen manifiesta.

Para hablar de los objetos *acerca de los cuales* versa una teoría científica, la autora retoma la propuesta de *ontología primitiva*⁷⁹:

Según la propuesta de ontología primitiva, todas las teorías físicas fundamentales tienen una estructura común que provee un esquema explicativo general con el que la teoría da cuenta de cómo es el mundo. Según esta propuesta, cualquier teoría física fundamental satisfactoria, si se toma desde un punto de vista realista, contiene una hipótesis metafísica acerca de qué constituye los objetos físicos, la ontología primitiva, que vive en el espacio tridimensional o en el espacio-tiempo y que constituye los bloques de construcción de todo lo demás. (Allori V., 2015, pág. 107)

La ontología primitiva es, entonces, acerca de lo que habla una teoría física fundamental y corresponde a aquello de lo que está hecho el mundo según la

⁷⁹ La noción de *ontología primitiva* fue inicialmente introducida en (Dürr, Goldstein, & Zanghì, 1992) y (Goldstein S., 1998) y más tarde detallada en (Allori, Goldstein, Tumulka, & Zanghì, 2008).

teoría. En general, cuando se habla de la ontología de una teoría, se está hablando de aquellas variables que dentro de la teoría representan lo que se supone que existe en el mundo. El adjetivo “primitiva”, en la propuesta que estamos analizando, implica que dentro de esa ontología hay algunos elementos más “importantes” que otros: “las variables primitivas representan la materia, aquello de lo que los objetos físicos como mesas y sillas están hechos, las variables no-primitivas, en contraste, no” (Allori V., 2015, pág. 109). La definición de estas variables y de las relaciones entre ellas constituye la imagen científica del mundo a partir de la cual deberíamos poder dar una explicación de la imagen manifiesta.

Según Allori, cuando un científico propone una teoría, generalmente ya tiene en mente una idea de cuál es la ontología primitiva de la misma y, dado que lo que se busca es dar cuenta del mundo a nuestro alrededor, lo más sensato es que dicha ontología se acerque lo más posible a los objetos con los que solemos relacionarnos, es decir, objetos en el espacio tridimensional. A lo largo de la historia de la física, la ontología primitiva de sus teorías se ha ido alejando de los objetos macroscópicos de la imagen manifiesta en aras de dar cuenta cada vez mejor de fenómenos fundamentales; esto es un movimiento natural y necesario, si queremos llegar a entender qué es lo que sucede en el mundo en el nivel más básico. Así pues,

[s]e ha considerado al mundo como hecho de campos, partículas, flashes, cuerdas, etc. Estas ontologías primitivas propuestas tienen algo en común: todas están en el espacio tridimensional o en el espacio-tiempo. ¿Por qué? Porque aunque parece razonable que podemos estar equivocados acerca del tipo de entidades de las que está hecho el mundo (campos, partículas, etc.), renunciar a la idea de que la materia vive en el espacio tridimensional y evoluciona en el tiempo parece demasiado, especialmente si no hay necesidad para ello. (Allori V., 2013, pág. 62)

Dado esto, la pregunta que debemos plantearnos es si vale la pena adoptar a la función de onda, tal y como la entiende WFR, como ontología primitiva; en otras palabras, si no existe una ontología más familiar por medio de la cual podamos explicar adecuadamente lo que observamos. Si hay una postura metafísica que sea más cercana a nuestra experiencia y que sea teóricamente

exitosa, parece que no hay justificación para defender una metafísica revolucionaria como la de WFR.

Siguiendo con su argumento, Allori explica que, una vez fijada la ontología primitiva, el científico construye un aparato matemático alrededor de ésta para intentar describir la dinámica de la misma. Como se mencionó antes, el formalismo de una teoría física fundamental contiene variables que representan la ontología primitiva y variables que representan otros elementos que son necesarios para determinar su dinámica, es decir, que cumplen un papel indispensable en cómo evoluciona en el tiempo la ontología primitiva. El error que comete el realista de la función de onda, según la crítica de Allori, es que infiere lo que él supone que es la ontología última del mundo exclusivamente a partir del aparato matemático. Éste es un movimiento incorrecto, pues, hasta cierto punto, la interpretación metafísica de la teoría suele ser fijada desde antes de proponer las ecuaciones: con base en una hipótesis metafísica, el científico elige qué objetos matemáticos dentro de sus ecuaciones van a representar lo que él asume que existe en el mundo y sobre cuya dinámica quiere dar cuenta. En el caso particular de la mecánica cuántica, por ejemplo, definitivamente no era el caso, al momento de su planteamiento, la idea de una ontología de la función de onda, es decir, el objetivo inicial de la teoría no era describir la dinámica de la función de onda como ente, sino algún otro fenómeno observable en el espacio tridimensional.

La virtud determinante de considerar la ontología primitiva como una ontología de objetos en el espacio tridimensional es que dichos objetos constituyen la base de un esquema explicativo por medio del cual se pueden recuperar las propiedades que experimentamos de los objetos macroscópicos a partir de las características y el comportamiento de la ontología primitiva. Allori presenta ejemplos específicos de la manera en la que funcionan tales esquemas explicativos en la física clásica (Allori V., 2013, pág. 67) con el objetivo de ilustrar el tipo de explicación que esperaríamos de una interpretación metafísica

provechosa de la mecánica cuántica. Así pues, si WFR quiere hacer de su propuesta ontológica una opción satisfactoria en este sentido, lo que tendría que hacer es plantear un esquema explicativo que permita recuperar la imagen manifiesta a partir de la imagen científica que está considerando como adecuada.

La apuesta de Albert en este sentido consiste en afirmar que la explicación de que el mundo nos parezca tridimensional se encuentra en la estructura del tipo de operador hamiltoniano que da lugar a la dinámica de la función de onda:

Aunque las $3N$ dimensiones están metafísicamente a la par [...], [e]l hamiltoniano agrupa las coordenadas del espacio de configuración $3N$ -dimensional en tripletas, de manera tal que puede haber objetos emergentes que tienen el mismo perfil funcional que lo que tomamos como objetos ordinarios en el espacio tridimensional. Esto da razones para creer que puede haber un espacio físico tridimensional emergente. (Chen, 2019)

El problema con este intento de solución —y otros similares— es que parece recuperar el mundo tridimensional a partir consideraciones *ad hoc*, pues en su planteamiento no se identifica una razón clara ni una fuente de evidencia confiable que permita concluir que, de hecho, el hamiltoniano de la ecuación de Schrödinger agrupa las coordenadas del espacio de configuración en grupos de 3, en lugar de grupos de 2, 15 o 97. Tal y como señala Bradley Monton (2006), hay maneras de entender al hamiltoniano como correspondiendo a todas esas posibilidades —y muchas más— y la evidencia que tenemos, o podríamos llegar a tener, no permite calificar como correcta a sólo una de ellas ni explicar, por ejemplo, por qué justo en ésta llegan a tener lugar fenómenos como los estados mentales. Así pues, no parece haber buenas razones por esta vía para considerar que la función de onda es un objeto real que vive en un espacio fundamental $3N$ -dimensional, pues no se propone un esquema explicativo satisfactorio que permita recuperar la imagen manifiesta del mundo.

Dado lo anterior, Allori insiste en que la mejor vía para lograr el propósito de reconciliar la imagen científica y la imagen manifiesta es identificar una teoría de la mecánica cuántica que tenga una ontología primitiva de objetos en el espacio tridimensional usual en el que ocurren nuestras experiencias. Como

vimos en el capítulo anterior, la mecánica bohmiana es una buena candidata para esto, pues considera la existencia de partículas físicas que viven en el espacio tridimensional.⁸⁰

Siguiendo una idea similar a la de Allori y la noción de ontología primitiva que acabamos de discutir, Goldstein y Zanghì (2013) afirman que la mecánica bohmiana es una teoría fundamental acerca de partículas y sus movimientos en el espacio tridimensional, es decir, una teoría cuya ontología primitiva consiste en un conjunto de partículas con posiciones definidas en el espacio usual. Para interpretar metafísicamente a la función de onda, en este caso, debemos estudiar el papel que dicho elemento juega dentro de la teoría bohmiana en relación con la ontología primitiva. Tanto Allori como Goldstein y Zanghì sugieren que el papel que la función de onda está jugando en la mecánica bohmiana es el de determinar la ley que rige el movimiento de la ontología primitiva y que, en ese sentido, la función de onda puede considerarse como un elemento nomológico metafísicamente a la par de las leyes de la naturaleza. De esta manera se puede seguir sosteniendo un realismo de la mecánica cuántica, sin comprometernos con una ontología revisionista como la propuesta por WFR.

Como vimos en el capítulo anterior, la mecánica bohmiana está definida como una teoría que describe al universo como un todo. Sus dos leyes dinámicas —ambas deterministas— se complementan de la siguiente forma: por un lado, la ecuación de Schrödinger describe la evolución en el tiempo de la función de onda universal; por el otro, la ecuación guía describe el cambio de posición de una partícula en función de la función de onda universal y de la posición de todas las demás partículas del sistema, es decir, del universo entero. Evidentemente, los científicos que hacen uso de la teoría bohmiana para hacer predicciones no pueden realizar experimentos que involucren controladamente al universo en su totalidad, sino que trabajan con subsistemas del mismo. Por esta razón, resulta

⁸⁰ Allori (2013) presenta otros posibles ejemplos de teorías cuánticas con ontología primitiva en el espacio tridimensional a partir de interpretaciones de GRW.

importante establecer qué es lo que dice la teoría con respecto a dichos subsistemas. ¿Tiene sentido hablar de la función de onda de un subsistema? ¿Pueden usarse las ecuaciones de la teoría bohmiana para describir un subsistema del único sistema genuinamente bohmiano por definición, a saber, el universo?

Aunque no se puede afirmar, sin un análisis extra, que un subsistema de un sistema bohmiano es también un sistema bohmiano, puede demostrarse formalmente que, de hecho, la función de onda de un subsistema bohmiano evoluciona tal y como se espera que lo haga la función de onda de un sistema bohmiano y, además, “colapsa” con las probabilidades que plantea la mecánica cuántica estándar que, como sabemos, sí pretende hablar de sistemas cuánticos diferentes al universo entero y ha sido exitosa en sus predicciones.⁸¹ En mecánica bohmiana, la función de onda de un subsistema del universo se comporta dinámicamente de la misma forma que la función de onda universal —según la ecuación de Schrödinger— y formalmente está descrita en términos de la función de onda universal y de la configuración de todas las partículas del universo, es decir, de aquello que es objetivo para la teoría; de esta manera, no cae en el problema de la medición. Como veremos a continuación, para establecer una postura metafísica con respecto a la función de onda va a ser importante tener clara la diferencia entre estos dos “tipos” de función de onda: la función de onda universal y la “función de onda” de un subsistema.

La propuesta metafísica que estamos revisando consiste en afirmar que, dado que la dinámica de la ontología primitiva de la mecánica bohmiana está determinada por la función de onda universal, esta última debe ser entendida metafísicamente como un elemento nomológico. Una de las principales críticas que suele señalarse contra este tipo de propuesta es que una ley de la naturaleza suele ser algo universal, objetivo e independiente del tiempo, y que la función de

⁸¹ Ver (Goldstein & Zanghì, 2013, págs. 94-96).

onda, definitivamente, no cumple con estas características. La respuesta de autores como Goldstein y Zanghì consiste en señalar que la función de onda universal —que es sobre la que estamos afirmando que debe considerarse como una entidad nomológica— es, precisamente, universal, objetiva y, de hecho, *puede*⁸² ser estática —a diferencia de la “función de onda” de un subsistema, que depende de una partición arbitraria del universo y depende temporalmente de la configuración del entorno y de la función de onda universal—.

Vale la pena enfatizar que una función de onda universal independiente del tiempo no implica que no haya cambio en el universo. En la teoría bohmiana, dada una función de onda independiente del tiempo, las partículas todavía pueden moverse de una manera no trivial, dado que una función de onda independiente del tiempo puede generar un campo de velocidad no trivial en el espacio de configuración. (Chen, 2019, pág. 8)

Ahora bien, incluso si la posibilidad de una función de onda universal independiente del tiempo resultara inviable, eso no refutaría definitivamente la interpretación metafísica nomológica de la función de onda. Al fin y al cabo, como vimos en el capítulo I del presente trabajo, esas supuestas características de las leyes de la naturaleza a las que se refiere esta familia de críticos no son condiciones necesarias de las leyes de la naturaleza; bien podría existir un mundo en el que haya leyes de la naturaleza que no son universales o que cambien cada cierto tiempo —o, incluso, todo el tiempo—.

Al entender metafísicamente a la función de onda universal como un elemento nomológico, el espacio de configuración deja de ser un problema, pues ya no tenemos que ir en contra de nuestro sentido común pensándolo como un espacio físico real en el que vive un objeto físico concreto, sino que podemos entenderlo como una herramienta de representación. Según esta propuesta, entonces, la función de onda es real, pero es real de una manera distinta a la de los objetos físicos: su estatus metafísico es el estatus metafísico de las leyes de la

⁸² Esta posibilidad depende de ciertos avances en teoría cosmológica cuántica; lo importante aquí es notar que la posibilidad existe y que, por ello, la propuesta en cuestión es verosímil. Ver: (Dürr, Goldstein, & Zanghì, 1997), (Goldstein & Teufel, 2001), (Goldstein & Zanghì, 2013).

naturaleza —la función de onda será una relación entre universales, si somos universalistas; un primitivo, si somos primitivistas; superveniente del mosaico humeano, si somos regularistas a la Lewis; etc.—. Veremos las implicaciones que tiene esta propuesta dependiendo de la concepción de ley de la naturaleza a la que nos adscribamos en el siguiente capítulo.

2.2. La función de onda como una propiedad de los sistemas cuánticos

Siguiendo con las críticas a WFR, quiero pasar ahora a la postura de Bradley Monton⁸³, a partir de la cual plantearé más adelante una propuesta alternativa a WFR. Como punto de partida para presentar su postura, Monton se compromete con dos afirmaciones: (1) que el espacio físico es tridimensional, y (2) que la mecánica cuántica es una teoría falsa. Las razones que tiene para sostener (1) son las mismas que ya hemos esgrimido anteriormente en el presente trabajo: el sentido común y nuestras experiencias cotidianas nos presentan el espacio en el que vivimos como un espacio con tres dimensiones y no existe —hasta ahora— evidencia empírica alguna que nos invite a renunciar a esa idea. Con respecto a (2), su motivación consiste, afirma él, en que las teorías físicas fundamentales con las que contamos en la actualidad, a saber, la mecánica cuántica y la relatividad general, son incompatibles, y la evidencia a favor de la relatividad general sugiere que la mecánica cuántica es falsa. Asumir la idea de que la mecánica cuántica es una teoría falsa abre las puertas, según él, para realizar un ejercicio filosófico interesante con respecto a la interpretación metafísica de dicha teoría.

La pregunta clave para Monton tiene que ver con la dimensionalidad del espacio físico fundamental *según la mecánica cuántica*. Es decir, la pregunta no debe ser “¿cuántas dimensiones tiene el espacio físico fundamental?”, que sería

⁸³ (Monton, 2006), (Monton, 2013).

una pregunta acerca de la realidad, sino “¿cuántas dimensiones tiene el espacio físico fundamental según la mecánica cuántica?”, que es una pregunta acerca de lo que dice la teoría en cuestión. Como se ha asumido que la teoría cuántica es falsa, la respuesta a dicha pregunta no tiene que estar necesariamente de acuerdo con la realidad, sino que, simplemente, es una pregunta que se le plantea a la teoría entendida como una historia autoconsistente.

El ejemplo en el que se basa el autor para exponer su argumento es el de la física aristotélica: una teoría física sobre la que tiene sentido intentar hacer una interpretación metafísica, aun cuando sabemos que es falsa. Para dar respuesta a la pregunta sobre el contenido ontológico de dicha teoría no podemos remitirnos a la realidad, sino, únicamente, a lo que pensaba el mismo Aristóteles al plantear y defender su teoría. Así, por analogía, en el caso de la mecánica cuántica debemos acudir directamente a los padres de la teoría cuando buscamos responder cuestiones acerca de su ontología. Monton se pone, entonces, en la tarea de buscar indicios en autores como Bohr, Schrödinger y Bohm acerca de la ontología que tenían en mente al proponer sus teorías cuánticas. La conclusión a la que llega es que ninguno de ellos consideraba entre la ontología de su teoría un espacio diferente al espacio tridimensional. Por lo tanto, la defensa que los realistas de la función de onda como Albert hacen del espacio de configuración como el espacio físico del que habla la mecánica cuántica es incorrecta. Sostener que ésa es una buena interpretación metafísica de la teoría, dice Monton, sería “como estar diciendo que Aristóteles estaba equivocado al entender la física aristotélica de la forma en que lo hacía” (Monton, 2013, pág. 159), lo que no tendría ningún sentido.

Ahora bien, supongamos que el defensor de WFR decide presentar su teoría como una teoría nueva que interpreta desde su planteamiento a la función de onda como un objeto físico que vive en un espacio altamente dimensional. En este caso, no podría argumentársele al realista de la función de onda que está equivocado con respecto a la interpretación metafísica de su propia teoría, pero

todavía podríamos pedirle que argumentara por qué su teoría es mejor que las otras opciones de teoría cuántica que hemos tenido hasta el momento. Según Monton, ahí va estar el mayor problema para WFR, pues, según él, no existen buenas razones para apoyar una ontología de este tipo. Todo el trabajo que realiza la función de onda entendida como un objeto físico en $3N$ dimensiones puede ser realizado por una *propiedad* del sistema de todas las partículas en el espacio tridimensional. En sus propias palabras:

[...] dada la elección entre una ontología $3N$ -dimensional radicalmente revisionista y una ontología tridimensional normal donde las N partículas en el universo poseen colectivamente una cierta propiedad, no tenemos una buena razón para adoptar la ontología radicalmente revisionista. (Monton, 2013, pág. 160)

Monton se basa en la regla *eigenvector-eigenvalor*⁸⁴ (también llamada *eigenestado-eigenvalor*) para justificar su postura de la siguiente manera:

[...] la función de onda es una representación del estado cuántico de ese sistema de N partículas. Este estado cuántico es el eigenestado de un observable. Ahora, lo que el vínculo eigenestado-eigenvalor sostiene es que, si el sistema de N partículas está en un eigenestado de algún observable, entonces el sistema de N partículas tiene de hecho la propiedad correspondiente a ese eigenestado. (Monton, 2013, pág. 160)

Así pues, Monton aboga por una interpretación de la teoría cuántica cuya ontología fundamental consiste en un sistema de N partículas que evoluciona temporalmente en un espacio físico tridimensional. Dicho sistema instancia una propiedad colectiva, o no-local, que: (1) no puede ser reducida a las propiedades intrínsecas de las partículas que componen el sistema y (2) formalmente puede ser representada por una función de onda en un espacio $3N$ -dimensional o por un vector en un espacio de Hilbert. Lo importante es tener presente que tales representaciones no deben ser sobreinterpretadas metafísicamente más allá de la propiedad misma, es decir, de lo que implica dinámicamente para el sistema físico descrito por la teoría poseer o no dicha propiedad. De cualquier manera, nos recuerda Monton, esta lectura de la teoría cuántica *tampoco* debe tomarse

⁸⁴ Ver capítulo II.

demasiado en serio, si lo que buscamos es aproximarnos a la ontología real del mundo, pues, al fin y al cabo, la mecánica cuántica es una teoría falsa.

Ahora bien, si bien es muy probable que la teoría cuántica sea refutada o reemplazada en un futuro por una teoría mejor, la decisión de Monton de desestimarla como una guía para aproximarnos a la ontología última del mundo me parece demasiado radical. Como he dicho antes, el éxito empírico de la teoría cuántica es tal que, siguiendo los argumentos del realismo científico, la mejor explicación para el mismo es que hay algo de verdadero en ella. Así pues, si me alejo de Monton con respecto a su consideración de que la teoría cuántica es falsa y, además, aplico a su propuesta el esquema de ontología primitiva estudiado en la sección anterior, puedo plantear una propuesta realista alternativa a WFR que considera los siguientes puntos: (1) la ontología primitiva de la teoría cuántica es un sistema de N partículas en el espacio tridimensional; y (2) su ontología secundaria incluye una propiedad no-local que es representada por la función de onda —el “valor” de tal propiedad determina el comportamiento de la ontología primitiva en el espacio físico tridimensional en el que hacemos nuestras observaciones—. ⁸⁵ De esta manera, tenemos una propuesta realista en la que la naturaleza ontológica de la función de onda coincide con la naturaleza ontológica de las propiedades. ⁸⁶

⁸⁵ Al hablar de partículas, esta interpretación metafísica de la teoría cuántica puede relacionarse con mecánica bohmiana. Es posible hacer una lectura metafísica similar para GRW, acudiendo a una ontología primitiva de densidad de masa (ver capítulo II).

⁸⁶ Existe una postura realista de la función de onda con implicaciones similares a las de ésta que estoy presentando, a saber, aquella en la que se entiende a la función de onda como un *multi-campo* en el espacio tridimensional. Esta postura, defendida por autores como (Belot, 2012) y (Hubert & Romano, 2018) propone que “[e]n lugar de pensar [a la función de onda] como un campo que asigna propiedades a cada punto en \mathbb{R}^{3N} , podemos pensarla como un “multi-campo” que asigna propiedades a cada región de \mathbb{R}^3 que está compuesta por N puntos” (Chen, 2019, pág. 10). La razón por la que he decidido no considerar esta propuesta en el presente trabajo tiene que ver con el hecho de que entender a la función de onda directamente como una propiedad puede resultar más económico metafísicamente que postular dos entes —el multi-campo y las propiedades asignadas por éste— que, en conjunto, cumplen la misma función que la propiedad no-local por sí sola. Hablaré más sobre esto en el siguiente capítulo.

Ahora bien, así como sucede con las leyes de la naturaleza, existen diversas posturas con respecto al estatus metafísico de las propiedades. Para el caso que nos ocupa será suficiente entenderlas conforme a la siguiente definición:

Las propiedades (también llamadas ‘atributos’, ‘cualidades’, ‘rasgos’, ‘características’, ‘tipos’) son aquellas entidades que pueden ser predicadas de las cosas o, en otras palabras, atribuidas a ellas. Además, las propiedades son entidades que se dice que las cosas soportan, poseen o ejemplifican. (Orilia & Swoyer, 2020)

La particularidad que tiene la propiedad representada por la función de onda, y la razón por la que los defensores de WFR la han señalado como una opción inadecuada, es, precisamente, que es una propiedad no-local. La manera en la que se han entendido típicamente las propiedades físicas fundamentales se ajusta a la doctrina de separabilidad que se discutió en el capítulo I, sección 3.3, del presente trabajo. Cuando se habla de las propiedades de un sistema físico, se asume que es posible reducir metafísicamente las propiedades que exhibe el sistema en su totalidad a las propiedades intrínsecas locales de cada uno de los objetos que lo componen, pero en el caso de la propiedad representada por la función de onda eso no sería posible.

Los defensores de WFR alegan que si en lugar de aferrarnos al espacio tridimensional, aceptamos la función de onda como un campo que vive en $3N$ -dimensiones, nos liberamos del problema de la no-localidad: “los valores de la amplitud y de la fase son considerados (como con todos los campos) como propiedades intrínsecas de los puntos en el espacio altamente dimensional con los que están asociados” (Albert, 2013, pág. 53), de esta manera, la función de onda es local en el espacio de configuración. Que esto sea, o no, un argumento convincente, dependerá de aquello que estemos dispuestos a sacrificar como fundamento metafísico del mundo. Como hemos visto, al igual que la propuesta de considerar a la función de onda como un elemento nomológico, considerarla como una propiedad no-local tiene la ventaja de salvar lo que nos dice el sentido común acerca del espacio físico fundamental. En el siguiente capítulo analizaremos si alguna de estas opciones resulta más apropiada para resolver el

problema que nos interesa acerca de la compatibilidad entre la tesis de superveniencia humeana y la mecánica cuántica.

2.3. *La función de onda como un nuevo tipo de categoría ontológica*

La última propuesta alternativa a WFR que quiero abordar aquí apunta a que la dificultad para capturar la naturaleza metafísica de la función de onda se debe a que es una instancia de una categoría ontológica nueva, es decir, un tipo de ente del que, hasta ahora, no teníamos noticia. Esta propuesta fue planteada y defendida inicialmente por Tim Maudlin.⁸⁷

La crítica que hace Maudlin a WFR se centra en algunas consideraciones matemáticas. Antes que nada, es importante recordar que una cosa es la función de onda como objeto matemático y otra cosa es lo que la función de onda representa, en este caso, los estados cuánticos —aunque con frecuencia se utilice el mismo término indistintamente para hablar de las dos cosas—. Lo primero que identifica Maudlin como problemático en WFR es que considera explícitamente que existe una relación *uno a uno* entre la función de onda (la representación matemática) y los estados cuánticos (lo representado).⁸⁸ Éste sería el caso más simple que se nos podría presentar y facilitaría en gran medida el análisis metafísico que queremos realizar. El problema es que, a pesar de lo que piense Albert, la cuestión no parece ser tan sencilla. Si la representación fuera uno a uno, esto querría decir que

[...] cualquier diferencia en la representación matemática significaría una diferencia en los números complejos asignados a un punto en el espacio de configuración y, por lo tanto, una diferencia en una propiedad física intrínseca en la denotación de ese punto. Dejando de lado el estatus del “espacio de configuración” [...], ninguna concepción estándar de la mecánica cuántica acepta

⁸⁷ (Maudlin, 2013)

⁸⁸ Ver cita de Albert en la sección 1 del presente capítulo. (Albert, 2013, pág. 53)

que haya tantos estados cuánticos físicamente distintos posibles. (Maudlin, 2013, pág. 130)

Según Albert, la función de onda, entendida como un campo, asigna un número complejo (magnitud y fase) a cada punto del espacio de configuración. Esto implica que, si cambiáramos la fase global de la función de onda, tendríamos como resultado un estado físico diferente. Como vimos en el capítulo anterior, la función de onda —como objeto matemático— es utilizada para asignar probabilidades a posibles resultados de experimentos. Ahora bien, es un hecho matemático que cambiar la fase global de la función de onda no altera las probabilidades que se pueden derivar de ella. Entonces, dado que las únicas consecuencias empíricas constatables de la teoría cuántica son las probabilidades que obtenemos de la función de onda, no hay manera de acceder empíricamente a una diferencia física correspondiente a una fase global diferente —si es que ése fuera el caso—. Es decir, experimentalmente no hay manera de distinguir entre dos estados físicos cuyas funciones de onda difieren únicamente en la fase global.

Esto último sugiere la posibilidad de que las funciones de onda que difieren sólo en su fase global no correspondan a estados físicos diferentes, sino al mismo estado físico, es decir, que la relación entre la función de onda y los estados cuánticos no es uno a uno, sino muchos a uno —muchas funciones de onda que sólo difieren en su fase global estarían representando el mismo estado cuántico—. Naturalmente, es posible que existan dos situaciones físicas diferentes que sean empíricamente indistinguibles, nadie está negando eso, pero Maudlin considera que la sospecha inmediata es que, si hay grados de libertad físicos inobservables en una teoría —en este caso, la fase global—, lo más probable es que sea posible proveer una teoría alternativa que los elimine y sea, por ello, más verosímil. Por tal razón, no parece necesario asumir WFR, si resulta que está multiplicando ociosamente nuestra ontología; lo más sensato sería buscar una interpretación metafísica alternativa que no introduzca esos grados de libertad extra.

El anterior no es el único problema ni el problema más grave que encuentra Maudlin en la postura de Albert. Como ya está claro, para Albert el espacio de configuración no es una simple herramienta matemática, sino que representa un espacio físico real o, para ser más específicos, *el* espacio físico real. Por su parte, el espacio tridimensional, en el que estamos acostumbrados a pensar que vivimos, resulta ser, para Albert, una mera ilusión. No contento con realizar esta impresionante afirmación, Albert asegura que el hecho de que el espacio físico real tenga $3N$ dimensiones, no tiene nada que ver con la configuración de N partículas en un espacio de tres dimensiones; sino que, más bien, esta alta dimensionalidad debe entenderse como algo fundamental, que está dado así por la naturaleza, y lo que debemos hacer es intentar realizar un análisis inverso para descubrir por qué nos parece que el mundo es tridimensional y que contiene N partículas.

El problema con la interpretación metafísica de Albert es que no parece tener en cuenta de dónde viene el formalismo de la teoría. Albert recibe un aparato matemático con el que se pretende representar ciertos aspectos de la realidad física y, simplemente, lo *reifica* sin tener en cuenta las motivaciones que hubo detrás de su formulación. Durante el desarrollo de una teoría física, con frecuencia se utilizan aparatos matemáticos que tienen una estructura distinta de la de aquello que se quiere representar; esto se hace de manera consciente, generalmente por razones pragmáticas que se deben tener en cuenta al momento de interpretar la teoría.⁸⁹ Así, es posible que un formalismo matemático admita una interpretación metafísica diferente o, incluso, que sea imposible relacionarlo directamente con la ontología que se tenía en mente al momento de su planteamiento. Tener en cuenta el contexto en el que se desarrolló el formalismo como principio metodológico para derivar conclusiones metafísicas a partir de

⁸⁹ Maudlin (2013) presenta un argumento detallado en el que expone las razones por las que se ha elegido el aparato matemático de la teoría cuántica y señala algunos posibles abusos en los que cae Albert en su interpretación metafísica de la teoría.

una teoría física nos permite dar pasos más firmes en el camino hacia el conocimiento de la realidad última del mundo.

Ahora bien, si tenemos en cuenta las anteriores sugerencias y no saltamos a *reificar* la función de onda y el espacio de configuración como lo hace WFR, aún queda por definir la naturaleza ontológica de la función de onda. Para dar cuenta de esto, Maudlin propone una estructura básica de las teorías físicas que puede resumirse en los siguientes tres elementos: *observables primarios*, *ontología primaria* y *ontología secundaria*.

Los *observables primarios* de una teoría son aquellos datos fácilmente accesibles por medio de la observación con base en los cuales es posible constatar lo predicho por la teoría. Una de las características principales de los observables primarios es que es posible proveer una descripción operacional de cómo pueden ser observados y, en general, es algo en lo que están de acuerdo teorías físicas en competencia.

Por su parte, la ontología de una teoría consiste en una colección de elementos entendidos como físicamente reales, en términos de los cuales descansan las leyes de la teoría. Entre los elementos de la ontología hay algunos de ellos cuyo comportamiento determina directamente los observables primarios; son estos elementos los que constituyen la *ontología primaria* de la teoría. Como nuestras observaciones primarias son siempre de objetos con localizaciones definidas en el espacio tridimensional ordinario (por ejemplo, la aguja en un aparato de medición; un led que se enciende —o no— en un tablero; etc.), entonces, la ontología primaria de una teoría debe ser una ontología local en el espacio tridimensional. El resto de la ontología, es decir, los elementos de la ontología que no determinan directamente los observables primarios, constituyen la *ontología secundaria* de la teoría.⁹⁰ (Maudlin, 2013, pág. 142 y ss.)

⁹⁰ Maudlin menciona explícitamente que su propuesta es similar a la propuesta de ontología primitiva de Allory, Goldstein, Tumulka y Zanghì que vimos anteriormente, pero decide no usar la misma terminología en caso de que sea necesario clarificar algunas diferencias sutiles.

La anterior estructura le da a Maudlin una nueva perspectiva para presentar parte de su crítica a WFR. Si (1) toda teoría física constatable debe considerar una ontología local en el espacio tridimensional ordinario que determine directamente los observables primarios, y (2) la ontología de WFR —es decir, la función de onda como un campo físico en el espacio de configuración—, es una ontología no-local en el espacio tridimensional ordinario, entonces, (3) no hay forma de que la ontología de WFR determine de manera directa nuestras observaciones; por lo tanto, no puede considerarse una teoría física constatable y no estamos justificados para creer en ella.

Volviendo a la estructura general de las teorías físicas, debe quedar claro que la clasificación en ontologías “primaria” y “secundaria” no tiene nada que ver con el “grado de realidad” de los elementos que componen cada uno de dichos conjuntos: ambos existen con el mismo “grado de realidad”. La diferencia radica en que la ontología secundaria no está directamente conectada con la determinación de los observables primarios, sino que, más bien, cumple un papel funcional en relación con la ontología primaria por medio del cual contribuye al contenido empírico de la teoría. Nótese que, al estar más remota a nuestro acceso empírico, la ontología secundaria se presta más para la especulación. Aunque esto es bueno, en algún sentido, porque nos permite jugar con diversas posibilidades, es importante ser cautelosos a la hora de proponer dicha ontología para evitar compromisos metafísicos muy costosos.

En este orden de ideas, si se aplica la estructura que acabamos de ver a las teorías cuánticas, Maudlin considera que el estado cuántico —representado por la función de onda— será clasificado como perteneciente a la ontología secundaria de la teoría. Por ejemplo, en el caso de la mecánica bohmiana se puede identificar fácilmente que: (1) los observables primarios (por ejemplo, la posición de la aguja en un aparato de medición) dependen directamente de la posición de las partículas en el espacio tridimensional; (2) dado lo anterior, las partículas constituyen la ontología primaria de la teoría y (3) como el estado

cuántico determina el movimiento de las partículas —a través de la ecuación guía—, entonces, éste hace parte de la ontología secundaria de la teoría.

Maudlin asegura que cualquier teoría cuántica plausible —como GRW, por ejemplo— contará entre su ontología primaria con *beables locales*⁹¹, esto es, elementos físicos que se pueden localizar en el espacio-tiempo 4-dimensional y que, en últimas, sirven para conectar la teoría con las observaciones.

Nótese que, al igual que en las dos propuestas anteriores, la interpretación metafísica de Maudlin es una postura realista tanto de la función de onda como del espacio tridimensional. En este caso, el estado cuántico es, también, un elemento físicamente real, pero queda por definir a qué categoría ontológica pertenece. Según Maudlin, dado que actualmente no tenemos información suficiente que nos permita determinar, al menos, las características más genéricas de su comportamiento, quizá lo más sensato sea clasificar al estado cuántico dentro de una categoría ontológica nueva y tener en cuenta que caracterizarla es parte del trabajo que queda por realizar. Es decir, la propuesta de Maudlin es que la función de onda representa un ente que pertenece a una categoría ontológica desconocida a la que podríamos llamar “estado cuántico”. De esta manera, así como en WFR se dice que la función de onda es un *campo*; en la propuesta de Allori *et al.* se dice que la función de onda es una *ley*, y en la propuesta que yo he planteado —insiparada en Monton— se dice que la función de onda es una *propiedad*; en esta propuesta diríamos que la función de onda es un *estado cuántico* —sea lo que sea que eso signifique—.

Si bien es concebible que la mecánica cuántica nos esté dando indicios de una categoría ontológica de la que no teníamos conocimiento hasta ahora, me parece que apresurarnos a aceptar esa posibilidad como un hecho quizá no sea metodológicamente lo más adecuado. Según los principios metafísicos que se han

⁹¹ La terminología de *beables locales* y *beables no locales* se remonta a (Bell, 1975). Tanto Maudlin como Allori *et al.* reconocen la influencia y similitudes de la propuesta de Bell en sus respectivas clasificaciones ontológicas.

mantenido como guía en este trabajo —y que el mismo Maudlin parece sostener cuando critica a WFR—, postular un nuevo tipo de ente estaría yendo en contra tanto del conservadurismo metafísico, como del principio de parsimonia (por no mencionar que habría razones para considerarla como una solución *ad hoc*, casualmente muy parecida a la propuesta del mismo Maudlin acerca de la naturaleza ontológica de las leyes de la naturaleza: las leyes son *leyes* y los estados cuánticos son *estados cuánticos*). Así pues, mientras no estén descartadas las otras dos propuestas que hemos estudiado en esta sección, dejaré de lado la posibilidad de que la función de onda, como ente, pertenezca a una nueva categoría metafísica.

3. Sumario

En el presente capítulo se han estudiado cuatro propuestas de interpretación metafísica de la teoría cuántica que apuntan a un realismo de la función de onda: 1) la función de onda como un campo en el espacio de configuración (WFR), 2) la función de onda como ley de la naturaleza, 3) la función de onda como una propiedad, y 4) la función de onda como un nuevo tipo de categoría ontológica. La primera de ellas, WFR, asume que la función de onda es un campo que vive en un espacio altamente dimensional, de manera que el espacio tridimensional de la experiencia humana es una ilusión. Después de presentar las razones por las que es cuestionable defender una interpretación en la que el espacio físico fundamental no coincide con el espacio tridimensional de nuestra experiencia, se han estudiado tres propuestas realistas de la función de onda que buscan conservar el espacio tridimensional como espacio físico fundamental.

Discutir y sentar una postura preliminar frente a estas posibles interpretaciones de la mecánica cuántica tiene como objetivo tener un punto de partida para poner a prueba la posibilidad de reconciliar la tesis de superveniencia humeana con la mecánica cuántica. Así pues, he ofrecido razones

para descartar, por el momento, WFR y la propuesta alternativa que apunta a entender a la función de onda como instanciando una nueva categoría ontológica. Entre las dos propuestas restantes, resulta de particular interés para los objetivos del presente trabajo la idea de entender a la función de onda como una ley de la naturaleza, pues, como se estudió en el capítulo I, la tesis de superveniencia humeana está estrechamente relacionada con una postura con respecto al estatus metafísico de dichas leyes. Por su parte, la idea de entender a la función de onda como una propiedad no-local también resulta especialmente interesante para el problema que nos ocupa, pues, como se vio en el presente capítulo, va en contra de la doctrina de separabilidad que típicamente se ha entendido como parte esencial de la tesis de superveniencia humeana.

Todas las consideraciones hechas hasta aquí sobre las leyes de la naturaleza, las teorías cuánticas y sus posibles interpretaciones metafísicas, constituyen la base de la que partiré en el siguiente capítulo para intentar resolver, desde una perspectiva naturalista, el problema que la mecánica cuántica le impone a la tesis de superveniencia humeana.

CAPÍTULO IV

HACIA UN HUMEANISMO CUÁNTICO

Recordemos una vez más que el objetivo último de esta investigación consiste en encontrar una manera de reconciliar la tesis de superveniencia humeana con la mecánica cuántica. En los capítulos anteriores he estudiado la teoría cuántica y algunas de las posibles interpretaciones metafísicas de la función de onda como elemento fundamental de dicha teoría. Llegados a este punto, busco una concepción metafísica de la función de onda que no sólo sea satisfactoria como interpretación metafísica de la mecánica cuántica, sino que, además, me permita reconciliar a la superveniencia humeana con la ciencia.

A lo largo de este trabajo, he ido delimitando el problema que me ocupa de manera que en este capítulo puedo hacer explícitos los criterios particulares que guían mi búsqueda de una solución al mismo. Con base en ellos, procedo a hacer un análisis de las propuestas sobre la mesa acerca de la naturaleza metafísica de la función de onda con miras a defender una tesis de superveniencia humeana que no quede invalidada por los resultados de la mecánica cuántica. Finalmente, complemento el espacio de posibles soluciones planteando una nueva propuesta y señalo las ventajas que tiene sobre las demás.

1. Dimensiones de aproximación al problema del realismo de la función de onda

El estudio realizado hasta aquí me ha llevado a identificar tres dimensiones básicas a tener en cuenta al momento de teorizar acerca del estatus metafísico de la función de onda. Como veremos, cada una de dichas dimensiones abre un espacio de posibilidades a partir del cual, dependiendo de los intereses

y compromisos particulares, cada quien puede determinar un criterio que le sirva como guía para plantear o evaluar una tesis acerca del estatus metafísico de la función de onda. A continuación, presento cada una de las tres dimensiones mencionadas y el espacio de posibles criterios de evaluación a los que da lugar, lo cual me permitirá categorizar las diferentes propuestas acerca del estatus metafísico de la función de onda, para luego evaluarlas con base en mis propios desiderata.

1.1. Interpretación de la mecánica cuántica

En el segundo capítulo hice énfasis en el problema fundamental de la mecánica cuántica estándar, a saber, el *problema de la medición*. Como vimos, a pesar de ser una teoría muy exitosa en términos predictivos, tal y como está formulada, la mecánica cuántica estándar difícilmente podría admitir una lectura realista, pues dicha teoría no especifica conceptualmente lo que ha de entenderse por ‘medición’ ni cuál es el proceso físico que ésta acarrea, sino que se limita a predecir cuáles son las probabilidades de obtener determinado resultado al “medir” cierta propiedad sobre un sistema cuántico. Así pues, si tenemos en cuenta que las predicciones de la mecánica cuántica estándar han sido comprobadas ampliamente en los experimentos, pero la teoría no ofrece una explicación acerca del proceso físico que ocurre para que se obtengan tales resultados, la actitud más conveniente frente a la mecánica cuántica estándar consistirá en un instrumentalismo científico, en lugar de un realismo científico.

Ahora bien, como ya se ha visto, uno de los presupuestos fundamentales del presente trabajo lo constituye una postura realista de la mecánica cuántica; si no fuera por esto, no habría conflicto alguno entre el éxito de la teoría y la tesis metafísica de superveniencia humeana. Dado esto, la primera dimensión que ha de servirnos como guía para resolver el problema acerca del estatus metafísico de la función de onda tiene que ver con las posibles soluciones al problema de la medición.

Las llamadas *interpretaciones* de la mecánica cuántica son teorías alternativas e independientes que hacen predicciones exitosas sobre el mismo dominio que la mecánica cuántica estándar, pero que, a diferencia de ésta, no se enfrentan al problema de la medición porque, de hecho, han sido postuladas con la intención de resolverlo. En el segundo capítulo hice una revisión de las *interpretaciones* más importantes de la mecánica cuántica y señalé a la *mecánica bohmiana* y a la teoría de colapso objetivo *GRW* como de particular interés, descartando, para el presente trabajo, las teorías tipo Everett. Para resolver el problema de la medición, estas teorías eliminan la dicotomía entre sistemas cuánticos y sistemas clásicos que mantenía la mecánica cuántica estándar. Así, no es el caso que un sistema clásico, llámese observador o aparato de medición, interactúe “misteriosamente” con un sistema cuántico e induzca en él un *colapso* de su estado físico durante el proceso de medición. Tanto para la mecánica bohmiana como para *GRW*, lo que hasta ahora llamábamos sistemas clásicos son sistemas exactamente del mismo tipo que los sistemas cuánticos y el proceso físico por medio del cual se llega al resultado de una medición se explica dependiendo de las leyes y consideraciones ontológicas de cada teoría.

Tanto en mecánica bohmiana como en *GRW*, la función de onda sigue cumpliendo un papel fundamental dentro de la teoría. Al haber llenado los vacíos conceptuales que presentaba la mecánica cuántica estándar, estas teorías cuánticas modificadas sí admiten una lectura realista. Acogerse particularmente a una de las *interpretaciones* de la mecánica cuántica es el primer paso para llegar a resolver la pregunta acerca del estatus metafísico de la función de onda; el reto, a partir de ahí, consiste en definir la naturaleza metafísica del elemento ontológico que ésta representa dentro de esa teoría particular.

El primer criterio que nos permitirá categorizar las propuestas acerca del estatus metafísico de la función de onda corresponde, entonces, a la teoría cuántica con respecto a la cual decidamos ser realistas. Dado que el papel que cumple la función de onda dentro de cada teoría cuántica es distinto, se entiende

que la naturaleza metafísica del elemento que representa no será necesariamente la misma en todas ellas. Por esta razón, para definir una postura acerca del estatus ontológico de la función de onda, lo primero, como ya dije, es definir la teoría cuántica con la que nos vamos a comprometer.

1.2. Espacio físico fundamental

En el tercer capítulo presenté una revisión de las principales propuestas a favor de un realismo de la función de onda. Como vimos, existe un aspecto en particular que divide a las propuestas sobre la naturaleza metafísica de la función de onda en dos grandes grupos, a saber, cuál es el espacio físico fundamental. En otras palabras, en el camino para llegar a una conclusión acerca de qué tipo de entidad representa la función de onda, un paso necesario es definir cuál es el espacio físico que vamos a tomar como metafísicamente fundamental, esto es, aquel espacio en el que viven los objetos físicos fundamentales (que no pueden reducirse a nada o que no supervienen a nada). Así pues, la segunda dimensión que ha de servirnos como guía para resolver el problema del estatus metafísico de la función de onda tiene que ver con la determinación del espacio físico fundamental.

Como ya se ha mencionado, al entrar a discutir la naturaleza metafísica de la función de onda es importante tener presente que una cosa es el objeto matemático —la función de onda— y otra cosa es el elemento de realidad representado por dicho objeto matemático (a pesar de que generalmente se utilice indistintamente el término ‘función de onda’ para referirse a ambos). Fenoménicamente, un sistema cuántico se entiende como un conjunto de partículas en el espacio tridimensional cuyo estado físico es descrito por la función de onda. Como se estudió en el capítulo II, la función de onda es una función que asigna un número complejo a un conjunto de puntos en un espacio tridimensional. La configuración de N partículas en el espacio físico fenoménico

puede ser representada como N puntos en el espacio 3D o como un punto en el espacio $3N-D$ —el *espacio de configuración*, altamente dimensional—.

Como se estudió en el capítulo III, algunos filósofos, como David Albert (2013), han decidido, con base en lo anterior, interpretar a la función de onda como un campo que vive en el espacio de configuración. Según su interpretación, la mejor forma de ser realista con respecto a la mecánica cuántica es asumir que el espacio físico fundamental es el espacio de configuración en el cual vive la función de onda como objeto físico fundamental. Desde esta postura, el espacio tridimensional y todo lo que vemos en él son sólo una “apariencia” que resulta de la evolución de la función de onda en ese espacio altamente dimensional.

Lo que en general provoca más rechazo ante el realismo del espacio de configuración es la idea de que el espacio físico fundamental resulte no ser el espacio fenoménico —ese espacio en el que vivimos los seres humanos y en el cual hacemos nuestras observaciones—, sino un espacio más allá de los fenómenos al que nunca podríamos acceder. Como se discutió en el capítulo anterior, esto, más que un prejuicio, puede ser entendido como un principio metodológico para hacer metafísica: antes de adherirnos a una metafísica tan alejada de la imagen manifiesta del mundo, lo mejor sería explorar a fondo otras posibilidades que mantengan al espacio tridimensional como fundamental. Sólo si no se encontrara ninguna forma consistente de interpretar metafísicamente a la teoría cuántica, entonces estaríamos justificados para decantarnos por una propuesta que entienda al espacio de configuración como fundamental.

El segundo criterio que voy a tener en cuenta para categorizar las propuestas acerca del estatus metafísico de la función de onda corresponde, entonces, al espacio físico que va a tomarse como metafísicamente fundamental. Dependiendo de la teoría cuántica en la cual nos enmarquemos (criterio 1) y de cuál asumamos como el espacio físico fundamental (el espacio tridimensional ordinario o el espacio de configuración) tendremos distintos espacios de posibilidad para una interpretación metafísica de la función de onda.

1.3. *Prioridad ontológica*

Entre las propuestas estudiadas en el capítulo III, una de las más prometedoras para resolver la cuestión acerca del estatus metafísico de la función de onda es la de entenderla como un elemento nomológico, es decir, como una ley de la naturaleza. Esta propuesta resulta particularmente interesante para este trabajo, si tenemos en cuenta que su objetivo último consiste en dar sentido a la tesis de superveniencia humeana, a saber, una tesis que sirve como base para una concepción metafísica específica acerca de las leyes de la naturaleza.

Si se entiende a la función de onda como una ley de la naturaleza, su estatus ontológico corresponderá con el estatus ontológico de dichas leyes. En el capítulo I se estudiaron las principales propuestas con respecto al estatus ontológico de las leyes de la naturaleza; a partir de las diversas concepciones estudiadas, se hizo evidente que un aspecto fundamental en este debate tiene que ver con si queremos aceptar a las leyes de la naturaleza como ontológicamente primitivas —metafísicamente fundamentales— o no.

Entre las propuestas con respecto a la noción metafísica de leyes de la naturaleza que se estudiaron, vimos que el primitivismo, el reduccionismo y el regularismo (o humeanismo) exhiben características interesantes para una investigación metafísica cercana a la ciencia. Para el primitivismo las leyes de la naturaleza existen como ontológicamente fundamentales y son el elemento modal básico a partir del cual se derivan todos los demás (causalidad, disposicionalidad, etc.). Por su parte, el reduccionismo y el regularismo tienen en común que entienden a las leyes de la naturaleza como ontológicamente derivadas. El reduccionismo entiende a las propiedades disposicionales como metafísicamente fundamentales y a las leyes de la naturaleza como reducibles a dichas propiedades, es decir, la existencia de las leyes se deriva directamente de la existencia de las propiedades. En cuanto al regularismo, éste entiende a las leyes de la naturaleza como supervenientes al mosaico humeano y, por lo tanto,

también en esta postura las leyes de la naturaleza son ontológicamente derivadas.

La tercera dimensión que voy a tener en cuenta, entonces, para categorizar las propuestas acerca del estatus metafísico de la función de onda tiene que ver con la prioridad ontológica de dicho elemento de realidad, es decir, tiene que ver con si ésta va a ser entendida como un elemento ontológicamente primitivo o no. Aunque la motivación para llegar a este tipo de criterio surge de un análisis de la propuesta de entender a la función de onda como un elemento nomológico, el criterio que propongo es más general y no se limita al carácter primitivo —o no— de las leyes de la naturaleza, sino al carácter primitivo —o no— de la función de onda, sea cual sea su naturaleza metafísica. Como veremos, la conveniencia de una u otra opción será sopesada dependiendo del marco metafísico general al cual nos adscribamos.

2. Categorización de posibles soluciones al problema del realismo de la función de onda

Habiendo establecido las dimensiones que me sirven para contextualizar la pregunta acerca de cuál es la manera más adecuada de entender la naturaleza metafísica de la función de onda, ha llegado el momento de empezar a definir los criterios específicos que me permitirán reconciliar la tesis de superveniencia humeana con la mecánica cuántica de la mejor manera posible dados mis compromisos teóricos, metafísicos y metodológicos.

El primer criterio que debemos definir, según las dimensiones de evaluación planteadas, es la teoría cuántica particular a partir de la cual vamos a estudiar la posible naturaleza metafísica de la función de onda. Como mencioné hace poco, la idea de entender a la función de onda como una ley de la naturaleza resulta particularmente interesante para este trabajo, si tenemos en cuenta que la tesis de superveniencia humeana constituye la base de una de las propuestas más relevantes con respecto a la naturaleza metafísica de las leyes de la

naturaleza. En el capítulo anterior vimos que la idea de entender a la función de onda como un elemento nomológico ha sido generalmente presentada dentro del marco de la mecánica bohmiana. La mecánica bohmiana es una teoría sólida y elegante que resuelve efectivamente el problema de la medición y que recupera a pie juntillas las predicciones de la mecánica cuántica estándar. Al compararla con las teorías de colapso objetivo, la mecánica bohmiana presenta dos características que pueden considerarse una ventaja, si uno tiene el objetivo de mantener una metafísica lo menos revolucionaria posible, a saber: (1) sus leyes dinámicas son deterministas; y (2) su ontología primitiva⁹² es generalmente entendida como una ontología de partículas con una posición definida en el espacio tridimensional. Dado todo esto, resulta pertinente tomar a la mecánica bohmiana como punto de partida para abordar el problema sobre la metafísica de la función de onda en esta investigación.

Nótese que tomar como punto de partida a la mecánica bohmiana no me compromete automáticamente con una concepción nomológica de la función de onda, pues la mecánica bohmiana es igualmente compatible con otras interpretaciones metafísicas de dicho elemento. Asimismo, vale la pena señalar que, a pesar de que la propuesta de entender a la función de onda como nomológica me esté sirviendo como base para empezar trabajar en una solución al problema que me ocupa, esto no quiere decir que me esté comprometiendo desde ya con esta postura. Al contrario, como se verá dentro de poco, profundizar en las implicaciones metafísicas de dicha propuesta no sólo hace evidentes algunos problemas de la misma, sino que abre la discusión a nuevos enfoques desde los cuales se podría abordar satisfactoriamente el problema que me interesa.

Con base en las otras dos dimensiones de aproximación al problema planteadas, a saber, cuál va a considerarse como el espacio físico fundamental y

⁹² Como se vio en la sección 2.1 del capítulo anterior, se entiende a la *ontología primitiva* como aquello acerca de lo cual habla una teoría física y cuyo comportamiento intenta describir.

si la función de onda es ontológicamente primitiva o no, se genera un espacio de posibilidad para un realismo de la función de onda que se puede esquematizar como se muestra en la tabla 1:

		Espacio físico fundamental	
		<u>3D</u>	<u>3N-D</u>
Prioridad ontológica de ψ	<u>primitiva</u>	A. 3D - ψ primitiva	B. 3N-D - ψ primitiva
	<u>no primitiva</u>	C. 3D - ψ no primitiva	D. 3N-D - ψ no primitiva

Tabla 1. Espacio de posibilidad metafísica para un realismo de la función de onda

A partir de este esquema se pueden categorizar las diferentes propuestas para un realismo de la función de onda e identificar fácilmente el tipo de metafísica con el que nos comprometeríamos al asumir una u otra. Por ejemplo, la propuesta de Albert de entender a la función de onda como un campo físico en el espacio de configuración corresponde al tipo de concepción metafísica caracterizado en la celda B de la tabla 1. Si mis compromisos metafísicos son tales que, digamos, no acepto un realismo del espacio de configuración, las posturas de los tipos B y D quedan inmediatamente descartadas de mi espacio de posibilidades y puedo concentrarme en las posturas que cabrían dentro de los tipos A y C.

Por el momento no voy a comprometerme con ningún tipo de metafísica de las caracterizadas en la tabla 1, sino que me limitaré a analizar, a la luz de las categorías establecidas, las posibles soluciones al problema de la tesis de la superveniencia humeana, si se asume un realismo de la función de onda.

3. La tesis de superveniencia humeana frente al realismo de la función de onda

Como vimos en el capítulo anterior, cuando autores como Allori, Goldstein y Zanghì proponen entender a la función de onda como una ley de la naturaleza, en ningún momento especifican cómo están concibiendo ellos la naturaleza metafísica de las leyes. Lo único que afirman es que podemos seguir siendo realistas con respecto a la función de onda entendiéndola como un elemento nomológico y no como un objeto ubicado en el espacio físico fundamental —sea 3D o 3N-D—. Para que quede, entonces, resuelta la cuestión acerca de la naturaleza metafísica de la función de onda es necesario especificar cómo van a entenderse metafísicamente las leyes.

En el capítulo I ya he presentado y estudiado algunas de las propuestas más relevantes con respecto a la metafísica de las leyes de la naturaleza, entre las que destacué el primitivismo, el reduccionismo y el humeanismo. El primitivismo afirma que las leyes de la naturaleza son ontológicamente primitivas, es decir, que son algo que *existe* de manera independiente de los objetos físicos y se impone sobre éstos gobernando su comportamiento. Por su parte, el reduccionismo supone que las leyes de la naturaleza resumen relaciones que se dan entre propiedades disposicionales: las leyes se reducen a disposiciones y las disposiciones son poderes que se manifiestan en el comportamiento de los objetos del mundo físico.

Si se aceptara el primitivismo de las leyes de la naturaleza, no habría mucho más que decir para terminar de especificar el estatus metafísico de la función de onda: la función de onda representa una ley de la naturaleza y las leyes de la naturaleza son ontológicamente primitivas. Entre los problemas que se identifican con respecto al primitivismo acerca de las leyes de la naturaleza⁹³

⁹³ Una presentación de los pros y contras de cada una de estas propuestas ya se ha hecho en el capítulo dedicado a la metafísica de las leyes de la naturaleza.

destaca el señalamiento de que parece ser una propuesta *ad hoc*, lo que en principio constituye una razón válida para negarse a aceptarla, al menos hasta no haber agotado otras posibilidades. En cuanto al reduccionismo, como ya he dicho, reduce las leyes de la naturaleza a propiedades disposicionales, por lo que la idea de entender a la función de onda como una ley, en este sentido, colapsaría en la propuesta de entenderla como una propiedad disposicional. Así pues, al menos por el momento, dejaremos de lado estas dos propuestas.

Ahora bien, por su parte, como vimos en el capítulo I, la idea del humeanismo es construir una noción de ley que no apele a hechos modales metafísicamente fundamentales. Se conoce como *superveniencia humeana* a la tesis de que el mundo consiste, fundamental y exclusivamente, en un mosaico de cuestiones de hecho particular locales. Es decir, la base metafísica del mundo es un arreglo de puntos en el espacio-tiempo en los que se instancian propiedades intrínsecas —de manera independiente de lo que suceda en cualquier otro punto— y todo lo demás que existe o acontece superviene a dicho mosaico. Así pues, no existen conexiones necesarias que predispongan lo que sucede con tales puntos: no hay leyes ni disposiciones ni causas como poderes misteriosos que determinen la configuración del mosaico; todo lo que hay es un arreglo espacio-temporal de propiedades intrínsecas y las leyes de la naturaleza supervienen a éste como teoremas del mejor sistema axiomático que lo describe.

Cuando entramos a preguntarnos qué implica entender a la función de onda como una ley de la naturaleza desde la concepción humeana, lo primero con lo que chocamos es que la mecánica cuántica parece desvirtuar la posibilidad de sostener una postura metafísica como la superveniencia humeana. El problema radica en que, tal y como es definido por Lewis (1986b), el mosaico humeano sólo acepta propiedades intrínsecas a puntos en el espacio-tiempo y relaciones espaciotemporales entre ellos; todo lo demás debe supervenir de ahí. Pero los sistemas cuánticos en estados enredados contemplados por la mecánica cuántica son sistemas cuyos estados físicos no pueden reducirse a las propiedades

intrínsecas de sus partes, es decir, no supervienen a cuestiones de hecho particular locales⁹⁴. Si esto es así, entonces, la tesis de la superveniencia humeana parece quedar refutada.

Los simpatizantes del humeanismo reconocen el problema que la mecánica cuántica supone para su propuesta, pero no aceptan que esto implique que ésta deba desecharse inmediatamente. Siendo el humeanismo una concepción comprometida con el fisicalismo, parte de su objetivo es reflejar lo que, de hecho, la mejor física actual está diciendo acerca del mundo. Lo que hay que hacer, entonces, es revisar la propuesta para determinar si hay alguna forma de reinterpretarla, o ajustarla, de manera que no vaya en contra de los resultados de la ciencia. A continuación, se ponen sobre la mesa algunas propuestas de superveniencia humeana que se toman en serio los retos impuestos por la mecánica cuántica.

3.1. Reinterpretación de la superveniencia humeana: realismo del espacio de configuración

Tal y como señalan —y castigan— Ladyman y Ross (2007), cuando Lewis planteó la propuesta de superveniencia humeana, la mecánica cuántica ya había hecho manifiesto el problema que había con la consideración de que todas las propiedades físicas fundamentales eran locales. Lewis era consciente de ello, pero, dada la vaguedad que encontraba en el planteamiento general de la teoría cuántica —como la que supone el problema de la medición—, se negaba a tomarla en serio como algo que amenazara su propuesta (Lewis, 1986b, pág. xi). Con el desarrollo y consolidación de las que hoy se conocen como *interpretaciones de la mecánica cuántica*, ha quedado claro que, independientemente de cómo se resuelva el problema de la medición, la física cuántica no puede deshacerse de los sistemas enredados y, por lo tanto, de las propiedades físicas fundamentales

⁹⁴ Ver capítulo I, sobre las nociones de ley, para más detalles sobre este problema.

no locales. En vista de esto, Lewis aceptó, posteriormente, que la superveniencia humeana debía ser reformulada para acomodar lo que la mecánica cuántica nos estaba enseñando sobre las propiedades físicas.

El objetivo de defender la Superveniencia humeana no es apoyar la física reaccionaria, sino más bien resistir los argumentos filosóficos de que hay más cosas en el cielo y la tierra de lo que la física ha soñado. Por lo tanto, si defendiendo la sostenibilidad filosófica de la Superveniencia humeana, esa defensa puede, sin duda, adaptarse a cualquier tesis de superveniencia mejor que pueda surgir de una mejor física. (Lewis, 1994, pág. 474)

Tomando como base la mecánica bohmiana, Barry Loewer (2004) propone una manera en la que se puede reinterpretar la tesis de superveniencia humeana para hacer frente al reto impuesto por el éxito de la teoría cuántica. Recordemos rápidamente en qué consiste la mecánica bohmiana. Primero que todo, la mecánica bohmiana es una teoría determinista que no presenta saltos abruptos tipo colapso de la función de onda. En ella se consideran dos leyes dinámicas: la *ley de Schrödinger*, que determina cómo evoluciona la función de onda en el tiempo, y la *ecuación guía*, que tiene entre sus parámetros a la función de onda y que determina cómo evoluciona la posición de las partículas en el espacio. Con estas dos leyes dinámicas la mecánica bohmiana se asegura de que las partículas tengan una posición definida en cada instante, además de una trayectoria continua en el espacio-tiempo.

Ahora bien, una característica importante de la teoría bohmiana es que la ecuación guía fija las posiciones de las partículas en el espacio tridimensional de una manera *no local*, pues, de acuerdo con ella, la posición de una partícula depende de la posición de todas las demás partículas del sistema en un instante dado; es allí donde reside el “misterio” de los estados cuánticos enredados. Como mencioné en el capítulo II, según la teoría bohmiana, el único sistema genuinamente cuántico es el universo en su totalidad. La *función de onda universal* corresponde al estado cuántico del sistema conformado por todas las partículas del universo, que en el espacio de configuración $3N$ -D se representan como un solo punto: la *partícula del mundo*, cuya trayectoria es *continua y local*

en dicho espacio. Teniendo esto en mente, para resolver el problema que la mecánica cuántica le impone a la tesis de superveniencia humeana, Loewer decide ser realista con respecto a: i) espacio de configuración, ii) la función de onda universal y iii) la partícula del mundo, pues, como ya he dicho, el estado físico de la partícula del mundo en el espacio $3N$ -D es perfectamente local. La idea de Loewer es seguir sosteniendo que todo lo que acaece en el mundo superviene a cuestiones de hecho particular locales, la diferencia es que ahora hemos cambiado de espacio físico fundamental: el mosaico ya no es un arreglo de puntos en el espacio tridimensional, sino en el espacio de configuración $3N$ -D.

Siguiendo el realismo de la función de onda de Albert, Loewer se adscribe a la idea de que la función de onda en el espacio de configuración actúa como un campo cuyo valor en un punto corresponde a la amplitud de la función de onda en ese punto, de manera que podemos pensarlo como una propiedad intrínseca a dicho punto. Así pues, según Loewer, lo que tenemos es un mosaico de cuestiones de hecho particular locales en el espacio de configuración, y si éste es el espacio físico fundamental, la superveniencia humeana, efectivamente, puede seguir sosteniéndose y todo lo demás superviene a las cuestiones de hecho locales que acaecen en él. Por ejemplo, para empezar, las posiciones de las partículas bohmianas en el espacio tridimensional ordinario ahora supervienen a la posición de la partícula universal y al valor del campo cuántico en ese punto. Si resulta que hay propiedades no locales en el espacio tridimensional, esto ya no es un problema para la superveniencia humeana, pues su base de superveniencia es metafísicamente anterior a dicho espacio y, por lo tanto, esas propiedades que son no locales en $3D$ de hecho están superviniendo a algo más básico que sí es local en el espacio físico fundamental. Nótese que al ser realista con respecto al espacio $3N$ -D y entender a la función de onda como un campo físico en dicho espacio, la propuesta de Loewer es una propuesta tipo B según la clasificación que hice en la tabla 1.

Si no tenemos ningún problema con comprometernos con un realismo del espacio de configuración ni con la manera de recuperar la imagen manifiesta del mundo a partir de lo que ocurre en ese espacio según la teoría cuántica, entonces podríamos tomar como viable la propuesta de Loewer para salvar al humeanismo de los problemas que le impone la mecánica cuántica. Aun así, no es claro que ésa sea la única ni la mejor forma de resolver dicho reto. Un problema que puede señalársele a esta propuesta es que, al entender a la función de onda como un campo que vive junto a la partícula del mundo en el espacio $3N$ -D, Loewer parece añadirle al mosaico humeano una ontología innecesaria que lo aleja del espíritu minimalista de la tesis de Lewis.

Una propuesta alternativa con la que se evitaría el problema que acabo de mencionar, y a la que llamaré *Loewer**, puede consistir en ser realistas con respecto al espacio de configuración y a la partícula del mundo, pero no con respecto a la función de onda entendida como un campo físico. A diferencia de la idea original de Loewer, en la propuesta que estoy planteando los puntos en el espacio de configuración no tienen una propiedad intrínseca fijada por la función de onda, sino que el mosaico humeano está compuesto exclusivamente por la partícula del mundo y su trayectoria en el espacio $3N$ -D.

Una vez fijado el mosaico humeano como lo acabo de describir, y según la concepción regularista de leyes de Lewis, resulta que al sistematizar axiomáticamente lo que sucede con la partícula del mundo en el espacio de configuración, el equivalente en términos $3N$ -dimensionales de la ecuación guía aparecería como un teorema del mejor sistema axiomático, es decir, sería una ley. En dicho teorema estaría codificada la función de onda que se entendería, entonces, como un elemento nomológico. La ventaja que tiene esta alternativa, con respecto a la propuesta de Loewer, es que resulta metafísicamente más parsimoniosa al no postular a la función de onda como una entidad extra, pues la trayectoria de la partícula del mundo es suficiente para recuperar a la función de onda como un elemento de realidad superveniente del mosaico humeano. Al

ser realista con respecto al espacio $3N$ -D, pero considerar a la función de onda como un elemento nomológico superveniente, la propuesta que he llamado *Loewer** sería una propuesta tipo D, según la clasificación de la tabla 1.

Una posible crítica a *Loewer** podría estar motivada por la idea de que no sólo es la posición de la partícula del mundo la que evoluciona, sino que también la función de onda cambia con base en la ecuación de Schrödinger, razón por la cual deberíamos darle un estatus ontológico fundamental a la función de onda. Aunque lo anterior podría ser el caso bajo una concepción metafísica distinta del mundo y de las leyes de la naturaleza, bajo la concepción humeanista no hay nada que, en principio, nos haga descartar la idea de que en el mejor sistema axiomático que describa al mundo en cuestión exista un teorema o conjunto de teoremas que codifiquen la trayectoria de la partícula del mundo sin tener que postular una entidad física extra —como un campo físico— que afecte a dicha partícula. Es decir, la ecuación de Schrödinger también aparecería de alguna manera dentro del mejor sistema axiomático codificando a la función de onda como elemento nomológico. Nótese que esta situación no tiene nada que ver con la teoría cuántica, sino, exclusivamente, con la concepción metafísica del mundo que asume el humeanismo.

Recordemos que la tesis de superveniencia humeana afirma que el mundo consiste en un arreglo de puntos en el espacio-tiempo en los que se instancian propiedades intrínsecas “perfectamente naturales” y las relaciones espaciotemporales entre ellos; todo lo demás superviene a partir de ahí. Al plantear esta tesis, Lewis no especifica una a una cuáles son esas propiedades perfectamente naturales, sino que deja en manos de la ciencia —de la mejor ciencia posible— la tarea de determinar cuáles son. Dado que las propiedades de objetos que describe la física fundamental se relacionan siempre con la evolución espacial del ente que las instancia, podría determinarse que la propiedad física básica, la única propiedad perfectamente natural en términos lewisianos, es la propiedad que tiene un punto del espacio de estar ocupado o no. Así, llevado al

extremo, el mosaico humeano podría reducirse a un arreglo de puntos *ocupados* en el espacio-tiempo y las relaciones espaciotemporales entre ellos. Según compromisos metafísicos extra, ese espacio puede llegar a ser definido como tridimensional, 3N-dimensional o alguna otra opción no considerada hasta el momento. En el caso de *Loewer**, como vimos, dicho espacio sería 3N-dimensional.

Imaginemos un mundo en el que sólo existe una partícula puntual en reposo.⁹⁵ Supongamos que postulamos que dicha partícula tiene masa y carga eléctrica. ¿Cómo podría asegurarse que la partícula en cuestión posee tales propiedades si no hay ninguna otra partícula que afecte la posición de la primera en función de sus respectivas masa y carga eléctrica? Según lo que vimos en el capítulo I con respecto a la concepción regularista acerca de leyes, si una supuesta ley no se manifiesta en un mundo, entonces esa ley no existe en dicho mundo. Asimismo, en este caso, manteniendo el espíritu humeanista de Lewis, si una supuesta propiedad no se manifiesta en un mundo, entonces esa propiedad no existe en dicho mundo.

Retomemos la idea de que el mosaico humeano podría limitarse a un arreglo de puntos *ocupados* en el espacio-tiempo y las relaciones espaciotemporales entre ellos. Al describir el mosaico humeano de un mundo que consta de una sola partícula puntual que se mantiene siempre en reposo, tendríamos que la única propiedad que existe en ese mundo es la propiedad de ocupación espacial. Ahora imaginemos un mundo en el que tenemos exclusivamente dos partículas puntuales que interactúan de tal manera que al sistematizar la descripción del mosaico humeano a partir de las posiciones de dichas partículas, resulta que la masa y la carga eléctrica supervienen como propiedades; es decir, en este mundo, las propiedades en cuestión supervendrían de la propiedad de ocupación de puntos en el espacio-tiempo y de las relaciones entre ellos. (En la siguiente

⁹⁵ Un ejemplo similar, pero relacionado con leyes en lugar de propiedades, se vio en el capítulo I del presente trabajo (página 54).

sección veremos algunos argumentos de otros autores para defender una posición similar acerca de la fundamentalidad de la propiedad de ocupación).

Ahora bien, un problema que sí puede señalársele a *Loewer** es que, si ya se ha eliminado a la función de onda de la ontología fundamental, entonces no parece haber razones para seguir sosteniendo un realismo del espacio de configuración. Recordemos que la razón principal para postular un realismo del espacio de configuración era la idea de que debíamos ser realistas con respecto a la función de onda, y como ésta vivía en el espacio $3N$ -D, entonces era necesario trasladar toda la realidad física hacia dicho espacio y encontrar la manera de recuperar el espacio tridimensional ordinario a partir de aquél. El principio utilizado en *Loewer** para eliminar a la función de onda de la ontología fundamental con base en la metafísica humeana abre la posibilidad de eliminar también el compromiso realista con el espacio de configuración. Éste es el punto de partida para presentar una familia de propuestas que pretenden salvar al humealismo de los problemas de la mecánica cuántica, manteniendo un realismo del espacio tridimensional.

3.2. Reinterpretación de la superveniencia humeana: realismo del espacio tridimensional

Buscamos una manera de reinterpretar o replantear la tesis de superveniencia humeana de tal manera que la mecánica cuántica no la refute y, además, que no involucre dotar al espacio de configuración de realidad. Éste es también el objetivo de Esfeld (2014) cuando plantea su propuesta de reajuste de la superveniencia humeana. Esfeld está interesado en encontrar una concepción metafísica del mundo que se ajuste tanto a las intuiciones como a las consideraciones científicas. El autor toma como punto de partida la idea de que entender el espacio de configuración como real no sólo va en contra del sentido común, sino que va en contra de la ciencia misma. Como se discutió en el capítulo anterior, al desarrollar una teoría de la física fundamental los científicos suelen

tener clara la distinción entre lo que es un espacio que sirve como herramienta matemática para su teoría y el espacio físico real en el que se encuentran las entidades de las que habla la teoría. Para el caso de la mecánica cuántica, entonces, Esfeld se va a basar en “interpretaciones” que permitan leer a la teoría como teniendo una ontología primitiva en el espacio tridimensional.

Recordemos que la ontología primitiva de una teoría física corresponde con la distribución de materia en el espacio físico fundamental a la que se refiere el formalismo de la teoría. Aparte de la ontología primitiva, una teoría física considera leyes —y, posiblemente, una ontología secundaria— que determinan el desarrollo temporal de dicha distribución de materia. Al considerar que la ontología primitiva debe coincidir con una distribución de materia en el espacio tridimensional, queda descartada la idea de tomar a la función de onda como el ente físico acerca del cual habla la teoría cuántica⁹⁶. Pero esto no quiere decir que la función de onda tenga que ser interpretada necesariamente de manera instrumental. Según el análisis de Esfeld, si no hace parte de la ontología, entonces la función de onda debe hacer parte del segundo elemento estructural de la teoría cuántica, a saber: las leyes. La idea, nuevamente, es que la función de onda pueda entenderse como un elemento nomológico en lugar de como una entidad física.

Como ya ha quedado claro, al definir una teoría física fundamental se especifican dos elementos básicos: por un lado, un conjunto de entes materiales fundamentales que se distribuyen en el espacio y, por el otro, las leyes que describen cómo evoluciona esa distribución. Ahora bien, la propuesta de Esfeld es que la tesis de superveniencia humeana logra reducir todo lo que hay y acaece en el mundo a esa distribución de materia en el espacio-tiempo 4-dimensional y, en particular, que las leyes de la mecánica cuántica de hecho supervienen a dicha distribución. Cuando dice que todo va a reducirse a la distribución de materia en

⁹⁶ Recordemos que una reificación directa de la función de onda supone entenderla como viviendo en un espacio $3N$ -dimensional.

el espacio-tiempo, Esfeld lo está diciendo en un sentido particularmente fuerte. A diferencia del humanismo de Lewis, en el que el mosaico incluye puntos en el espacio-tiempo con múltiples propiedades intrínsecas, en este caso la única propiedad que se considera es la propiedad de ocupación de un punto⁹⁷, cualquier otra propiedad que esos bits de materia locales pudieran tener no forma parte del mosaico base de Esfeld. Ahí está, precisamente, lo novedoso de la propuesta. De nuevo: todo lo que hay, incluidos estados físicos, propiedades y hechos nómicos —como las leyes de la naturaleza—, superviene a la distribución de materia total en el espacio-tiempo; las propiedades no juegan ningún papel en la base de superveniencia, por lo que la existencia de propiedades no-locales, como las que postula la mecánica cuántica, deja de ser un problema para el humanismo. La única propiedad que va a importar aquí es la propiedad de que un punto del espacio-tiempo esté ocupado o no. La idea es que no nos preguntemos mucho más acerca de las características de aquello que está ocupando los puntos espaciotemporales, porque, en última instancia, lo único que cumple un papel para la superveniencia es la distribución de dichos entes.

La pregunta, ahora, es si la mecánica cuántica efectivamente nos permite interpretarla de esta manera, es decir, como teniendo una ontología primitiva a partir de cuya distribución superviene todo lo demás. Siguiendo la terminología de Bell (1975)⁹⁸, Esfeld se pone en la tarea de identificar aquellas teorías

⁹⁷ Este es el caso límite para el mosaico humano del que hablé cuando presenté la propuesta *Loewer**.

⁹⁸ “La terminología, *be-able** como opuesto a *observ-able*, no está diseñada para aterrorizar con metafísica a aquellos dedicados a la física real. Es elegida, más bien, para ayudar a hacer explícitas algunas nociones ya implícitas en, y básicas a, la mecánica cuántica ordinaria. Ya que, en palabras de Bohr, ‘es decisivo reconocer que, por mucho que los fenómenos trasciendan el alcance de la explicación física clásica, el reporte de toda evidencia debe ser expresado en términos clásicos’. [...]

El concepto de ‘observable’ [en mecánica cuántica] se presta para matemáticas muy precisas al ser identificado con ‘el operador auto-adjunto’, pero físicamente es más bien un concepto vago. [...] podría esperarse que cierto aumento en la precisión puede ser posible al concentrarnos en los beables, los cuales pueden ser descritos en ‘términos clásicos’ porque están ahí. Los beables deben incluir la configuración de interruptores y perillas en equipos experimentales, las corrientes en las bobinas y las lecturas de los instrumentos. Los ‘observables’ deben estar hechos, de alguna manera, de beables. La teoría de beables locales debe contener y dar significado físico preciso al álgebra de observables locales.

cuánticas en las que se definen específicamente beables locales y toma tres de ellas como punto de partida, a saber: la mecánica bohmiana; GRW con distribución de densidad de materia continua; y GRW con distribución de flashes.⁹⁹

Recordemos que, siguiendo el primero de los criterios de evaluación que definí al comienzo de este capítulo, nos estamos concentrando en la mecánica bohmiana, razón por la cual no haré referencia al análisis que hace Esfeld de las teorías GRW. Para el caso de la mecánica bohmiana, la ontología primitiva son las partículas en el espacio tridimensional que siempre tienen una posición definida y una trayectoria continua en el espacio-tiempo —esto serían los beables locales—. La función de onda, que evoluciona de acuerdo a Schrödinger, juega un papel fundamental dentro de la ley representada por la ecuación guía, a saber, determinar las velocidades de las partículas en un momento dado a partir de la posición de todas las partículas del sistema en ese momento.

Hasta ahora, nada nos lleva a pensar que las leyes bohmanas supervengan a la distribución de su ontología primitiva en el espacio-tiempo. Al contrario, parece que los defensores de esta teoría generalmente consideran a las leyes como algo *extra*, algo que se impone sobre la ontología primitiva y tiene los efectos observables de los que tenemos indicio.¹⁰⁰ Una razón para esto es que la distribución de la ontología primitiva en un instante dado no es suficiente para

La palabra 'beable' también se usará aquí para implicar otra distinción, ésa que ya es familiar en la teoría clásica entre cantidades 'físicas' y 'no-físicas'. En la teoría electromagnética de Maxwell, por ejemplo, los campos \vec{E} y \vec{H} son 'físicos' (beables, diremos), pero los potenciales \vec{A} y \emptyset son 'no-físicos'. [...]

Estaremos particularmente preocupados por los beables locales, aquellos que (a diferencia, por ejemplo, de la energía total) pueden ser asignados a una región limitada del espacio tiempo." (Énfasis en el original) (Bell, 1975, págs. 1-2)

*Nota de la traductora: He mantenido en inglés la palabra 'beable', dado que, típicamente, también en la discusión filosófica en español nos referimos con el término en inglés a dicho concepto. Al proponer el término 'be-able', en contraposición al término 'observ-able', Bell espera que el énfasis en el morfema 'be' ('ser', en español) sirva como guía para identificar un concepto que supone una distinción metafísica.

⁹⁹ Ver capítulo II del presente trabajo.

¹⁰⁰ Esto correspondería a una concepción necesitarista de las leyes de la naturaleza.

determinar la función de onda universal, es decir, no es suficiente para deducir el estado cuántico del sistema en ese instante. Resulta que, según la teoría, puede haber dos o más configuraciones espaciales instantáneas idénticas de partículas, cada una con diferentes funciones de onda y, por lo tanto, diferentes evoluciones temporales. La clave para poder llegar a defender la tesis de superveniencia humeana frente a esto radica, precisamente, en hacer énfasis en lo que significa la evolución temporal para un humeanista.

Nótese que, efectivamente, si no se está considerando la distribución total en el espacio-tiempo, sino sólo la distribución de las partículas en el espacio en un instante dado, no es posible identificar unívocamente la función de onda. Pero justo lo que propone la tesis de superveniencia humeana es que las leyes de la naturaleza supervienen a la totalidad de la distribución de la ontología primitiva en el espacio-tiempo. Si consideramos el mosaico completo —es decir, la distribución de partículas en todo el espacio-tiempo y no sólo en un instante dado—, es posible determinar cómo evolucionó en el tiempo la distribución de partículas y, a partir de allí, determinar la función de onda y los demás hechos nómicos como supervenientes. “Las leyes de la naturaleza no son fijadas cuando hay una configuración inicial de cuestiones de hecho particular locales; [sino que] éstas son determinadas sólo al final del mundo, por decirlo así”. (Esfeld, 2014, pág. 459). Lo esencial aquí es mantener presente que, aunque se utilice un discurso que habla de leyes que *determinan* la evolución de la ontología primitiva, metafísicamente tales leyes no son fundamentales ni están determinando nada, sino que son elementos que supervienen al mosaico compuesto por la ontología primitiva distribuida en el espacio-tiempo y que se identifican como teoremas del mejor sistema axiomático que describe tal distribución.

En resumen, Esfeld considera que si entendemos que las cuestiones de hecho particular locales corresponden simplemente a la “ocurrencia” de ontología primitiva en un punto del espacio-tiempo, la tesis de superveniencia humeana

de Lewis puede tomarse de manera literal y cumplir con su objetivo de dar cuenta de cómo todo lo demás que acaece en el mundo, incluidas propiedades físicas “fundamentales”¹⁰¹ y hechos modales, superviene al mosaico humeano. Aplicado a la mecánica bohmiana, entonces, el mosaico humeano estaría constituido por la distribución de partículas bohmianas en el espacio-tiempo y las leyes supervendrían a esta distribución como teoremas del mejor sistema, incluyendo a la función de onda como un elemento nomológico. Al mantener a la ontología fundamental en el espacio tridimensional y entender a la función de onda como superveniente, la propuesta de Esfeld corresponde a una postura tipo C, según la clasificación de la tabla 1.

Otros autores buscan defender una postura similar (tipo C), exhibiendo motivaciones y compromisos metafísicos con un matiz un poco distinto. Éste es el caso, entre otros, de Callender (2015) y de Bhogal & Perry (2015).

La propuesta que hace Callender puede reconstruirse como una propuesta que se desarrolla en dos partes. Por una parte, motiva sus razones para entender a la función de onda como un elemento nomológico y, por otra, recurre a la superveniencia humeana para dar cuenta de la naturaleza metafísica de dicho elemento. El objetivo de Callender es dar una solución al problema al que él se refiere como *perdidos en el espacio* (“*lost in space*”). Dicho problema surge cuando tomamos una teoría cuántica con beables locales en el espacio tridimensional y queremos dar cuenta de la función de onda que vive en el espacio $3N$ -dimensional. Para abordar el problema, Callender se enfoca en la mecánica bohmiana por considerarla la teoría con beables locales más desarrollada hasta el momento, pero sugiere que un análisis similar podría hacerse para otras teorías cuánticas.

¹⁰¹ Según esta postura, lo que la ciencia ha entendido como propiedades físicas fundamentales (como masa, carga eléctrica, etc.) resulta ser también superveniente, de manera que tales propiedades no serían metafísicamente fundamentales.

A primera vista, parece que la mejor forma de entender a la mecánica bohmiana es como postulando una ontología constituida por un conjunto de N partículas en el espacio físico ordinario y un campo físico que guía el movimiento de tales partículas. El problema es que ese supuesto campo físico, que aparece en la ecuación guía que define las posiciones de las partículas en el espacio tridimensional, no corresponde a un campo en dicho espacio, sino que está definido sobre un espacio muy diferente, a saber, un espacio de $3N$ dimensiones. ¿Cómo podrían relacionarse dos objetos físicos que viven en espacios diferentes? Éste es el problema al que apunta Callender.

Para solucionar el problema de *perdidos en el espacio*, Callender se acoge a la idea de entender a la función de onda no como un ente físico, sino como un elemento nomológico, y presenta argumentos nuevos —diferentes a los que ya hemos estudiado en (Dürr, Goldstein, & Zanghì, *Bohmian mechanics and the meaning of the wave function*, 1997), (Goldstein & Zanghì, 2013)— para motivarla. Su argumento consiste en comparar la mecánica cuántica y la mecánica clásica expresándolas en el mismo formalismo, de manera que se pueda hablar de una “función de onda clásica” sobre la cual es claro que no es un elemento ontológico y, por analogía, motivar el entendimiento de la función de onda cuántica como un elemento nomológico.

La mecánica cuántica puede ser descrita en un marco Hamilton-Jacobi en el espacio de configuración, justo como la mecánica clásica; y hacia el otro lado, la mecánica clásica puede ser formulada en un espacio de Hilbert. En ambos casos tenemos funciones de onda clásicas evolucionando de acuerdo a una “ecuación de Schrödinger” en espacios altamente dimensionales, reglas de Born clásicas y, en general, contrapartes clásicas de la mayoría —pero desde luego no de todo— de lo que uno entiende como cuántico. Tenemos todos los ingredientes para un problema de “perdidos en el espacio”. Pero como las cosas son comparativamente claras en física clásica, el problema nunca surge. (Callender, 2015, pág. 3163)

Callender reconoce que la analogía no es perfecta y que hay una diferencia particularmente problemática que es la que ha llevado a muchos a defender un tratamiento de la función de onda como ente. La cuestión es que en mecánica bohmiana la función de onda parece ser un “agente causal”, es decir, siguiendo a

Holland (1993), parece ser *algo* necesario para generar el movimiento de los *beables*. Entonces, aunque para la mecánica clásica puede ser conveniente un formalismo en el que se especifique una función de onda, ésta no es realmente necesaria para definir las trayectorias de las partículas clásicas y es ahí donde se rompe la analogía. Dado que para determinar las trayectorias de las partículas bohmianas la función de onda cuántica sí parece ser un elemento indispensable, la conclusión obvia para muchos es que hay que entenderla como un ente físico. Pero ésta no es la única vía para darle sentido al papel que juega la función de onda dentro de la teoría bohmiana. Si nos apegamos a una visión de superveniencia humeana del mundo, afirma Callender, la función de onda no requiere ser entendida como haciendo parte metafísicamente fundamental de dicho mundo, sino que puede supervenir como un elemento nomológico a partir del mosaico de partículas bohmianas en el espacio-tiempo. Como el humeanismo niega la existencia de hechos modales fundamentales, la aparente *agencia causal* de la función de onda sólo tendrá sentido como resultado de un análisis de contrafácticos y mundos posibles a la Lewis (1973) o algo similar.

Evidentemente, la postura de Callender es, en esencia, la misma que la de Esfeld. Quizá la única diferencia radica en el énfasis que cada uno de ellos hace con respecto al papel de las propiedades físicas fundamentales dentro del mosaico humeano. Para Esfeld, la novedad de su propuesta recae totalmente en la eliminación de las propiedades físicas fundamentales de la base del mosaico, de ahí que el título del artículo en el que la presenta sea: *Humeanismo cuántico, o: fisicalismo sin propiedades*. Por su parte, Callender no se detiene mucho a especificar qué cosas o propiedades *deben* o no hacer parte del mosaico humeano; de hecho, comenta que el humeanismo no es claro a ese respecto y, por lo mismo, él tampoco lo es. Aun así, su postura frente a esto se hace un poco más clara a partir de una de las lecciones que saca, al final, de su propuesta:

[...] es *posible* entender a la mecánica clásica y a la mecánica cuántica como postulando la misma ontología exacta, pero difiriendo solamente en las leyes. Interprete la mecánica cuántica de manera bohmiana y elija la posición como el único beable. Uno puede hacer exactamente lo mismo clásicamente, adoptando una

interpretación “bohmiiana” de la mecánica newtoniana y eligiendo la posición como el único beable de la mecánica newtoniana. Ambas teorías son entonces acerca de una ontología austera de entidades poseyendo sólo posición intrínsecamente. Argüiblemente este entendimiento “bohmiiano” de la mecánica newtoniana es el más natural. Después de todo, la carga y la masa clásica son términos teóricos. Es natural para un humeano tratar éstas como características también de lo nomológico. (Callender, 2015, pág. 3173)

Aunque el objetivo de Callender no era salvar al humeanismo de la amenaza impuesta por la mecánica cuántica, sino indagar directamente sobre la naturaleza metafísica de la función de onda, su propuesta de solución, finalmente, cumple ambas funciones. Esto podría tomarse como una razón para pensar que las soluciones de este tipo van por buen camino.

Una crítica que puede hacerse a las propuestas de Esfeld y Callender es que se quedan en “intuir” que la función de onda supervendrá al mosaico humeano como un *elemento nomológico*, pero no explican a detalle cómo o en qué sentido podría entenderse esto. La concepción del mejor sistema prevé la superveniencia de las leyes de la naturaleza como teoremas del mejor sistema axiomático, pero la función de onda no es estrictamente una ley dentro de la mecánica bohmiiana, aunque sí sea un elemento esencial de una de sus leyes — la ecuación guía— y evolucione a partir de la otra —la ecuación de Schrödinger—. Así, puede pensarse, entonces, que la función de onda no aparecerá como un teorema en el mejor sistema axiomático, sino que será un elemento superveniente que juega un papel en varios teoremas. ¿Cómo se caracteriza dicho elemento (nomológico) desde una perspectiva humeanista? Eso es lo que intentan resolver Bhogal y Perry (2016) con su *humeanismo de dos estados* (“*Two-State Humeanism*”).

El humeanismo de dos estados también es una propuesta tipo C. Aunque no entraré en detalles aquí sobre esta propuesta, la idea es entender a la función de onda como una especie de estado físico no-local superveniente del mosaico humeano. Se llama humeanismo de *dos estados* porque, a diferencia del humeanismo “típico”, que sólo aceptaba estados-de-regiones como superviniendo

exclusivamente al mosaico bajo esa región —por ejemplo, la masa total de un conjunto de partículas es la suma de las masas de esas y sólo esas partículas—, en esta nueva versión de humeanismo se acepta otro tipo de estado superveniente, cuya base de superveniencia es el mosaico completo y no sólo la región de la que se predica dicho estado —por ejemplo, el estado cuántico instantáneo de dos partículas enredadas no depende sólo de las dos partículas en ese instante, sino de todo el mosaico—. Al conjunto de estos estados novedosos los autores le llaman L-estado. La propuesta es un poco entreverada, pero con el ejemplo de la mecánica bohmiana puede aclararse un poco. Para el caso de un mundo bohmiano tendremos un mosaico compuesto por partículas libres de propiedades intrínsecas que ocupan puntos en el espacio-tiempo. De dicho mosaico superviene un L-estado que está compuesto por tres elementos: el espacio de configuración; la partícula del mundo y la función de onda universal. El mejor sistema axiomático que describa el mosaico incluirá axiomas que relacionen al mosaico con el L-estado, para dotarlo de significado; en este caso, la ecuación guía y la ecuación de Schrödinger cumplen ese papel. La idea es que la introducción del L-estado permite construir sistemas axiomáticos más simples e informativos que un humeanismo que no permite L-estados.

La propuesta de Bhogal y Perry, entonces, es un ejemplo de postura tipo C que se toma en serio la tarea de explicar *cómo* es que la función de onda es un elemento nomológico superveniente del mosaico humeano. El desarrollo “formal” de la propuesta resulta en un ejercicio interesante que ilustra —hasta cierto punto— cómo se llevaría a cabo la axiomatización de un sistema humeano cuántico y cómo ha de entenderse la superveniencia de algunos elementos a partir de allí. Pero los efectos de este trabajo riguroso pueden no tener el alcance suficiente. A pesar de que va bien encaminado a robustecer la concepción tipo C, haciéndola más específica, parece que este tratamiento sólo satisface a quienes ya estaban comprometidos espiritualmente con ella. Lo que quiero decir es que alguien que no considere verosímil la propuesta de Esfeld o de Callender

difícilmente se va a dejar convencer por el humanismo de dos estados porque, esencialmente, defienden lo mismo.

Hasta el momento, parece que sólo hay una manera de reconciliar la superveniencia humana con la teoría cuántica y mantener un realismo del espacio tridimensional ordinario, a saber, comprometerse con una base metafísica carente de cualquier otra propiedad que no sea la de ocupar un punto en el espacio-tiempo. El humanismo “clásico” define la ontología básica del mundo como un mosaico de propiedades intrínsecas locales en el espacio-tiempo y las relaciones espaciotemporales entre ellas. Aunque la lectura que se hace de la superveniencia humana en las propuestas tipo C no está violando técnicamente ninguno de los supuestos del humanismo “clásico” al eliminar las propiedades físicas fundamentales, sí parece que en algún sentido no era ése el espíritu de la propuesta de Lewis. ¿Cómo puede diferenciarse un punto ocupado de uno no-ocupado si “aquello” que lo ocupa no tiene ninguna propiedad? La idea de un mundo sin propiedades físicas fundamentales parece estar planteando una metafísica que se aleja de algunas de las intuiciones más básicas que tenemos con respecto al mundo. Recordemos que parte de la metodología metafísica por la que se guía el presente trabajo nos indica descartar otras opciones, antes de adherirnos a una metafísica revolucionaria. Así pues, un veredicto sobre el humanismo tipo C deberá esperar hasta que hayamos estudiado con cuidado la posibilidad de mantener un mosaico humano cuántico con propiedades físicas fundamentales.

3.3. Reinterpretación de la superveniencia humana: la función de onda como metafísicamente primitiva en 3D

Tomando como base los criterios de evaluación que se derivaron del estudio riguroso del problema que nos atañe en capítulos anteriores, planteé al principio del presente capítulo la tabla 1 (página 145); allí quedó claro que el espacio de posibilidades con respecto a la discusión sobre el estatus metafísico de

la función de onda en relación con la tesis de superveniencia humeana incluía cuatro tipos de posturas metafísicas fundamentales: A. ser realista del espacio tridimensional ordinario y primitivista de la función de onda; B. ser realista del espacio de configuración y primitivista de la función de onda; C. ser realista del espacio tridimensional ordinario y no-primitivista de la función de onda, y D. ser realista del espacio de configuración y no-primitivista de la función de onda. Como ya hemos vistos, hasta el momento, en la literatura, las propuestas han girado básicamente en torno a las posibilidades del tipo B y C. En la sección 3.1., y con la intención de tener un panorama completo de las posibles soluciones al problema que me ocupa, planteé una solución del tipo D. Mi objetivo en esta sección es proponer una solución del tipo A, mostrando cómo evita algunos de los problemas a los que se enfrentan las soluciones analizadas hasta aquí; pero antes de eso quiero hacer referencia a una de las pocas propuestas tipo A que se encuentran actualmente en la literatura, lo que me permitirá sentar un punto de contraste para mi propuesta.

¿Puede la función de onda en el espacio de configuración ser reemplazada por funciones de onda de una partícula en el espacio físico?, se preguntan en el título de su artículo Norsen, Marian, y Oriols (2015) para, seguido, presentar su propuesta acerca de la naturaleza metafísica de la función de onda. Aunque esta propuesta no está dirigida a solucionar el problema de la superveniencia humeana en relación con la mecánica cuántica —que es al que estamos apuntando aquí—, alguien que quisiera adoptar una postura tipo A podría pensar en tomarla como punto de partida y por eso vale la pena hacer referencia a ella en este momento.

Norsen y compañía toman como motivación la discusión sobre el significado físico de la función de onda en la mecánica bohmiana. Después de señalar algunos de los problemas de cada una de las dos posturas típicas —en nuestra nomenclatura, los tipos B y C—, se ponen en la tarea de postular una nueva opción, respondiendo afirmativamente a la pregunta que da título a su

artículo. La idea es que la función de onda universal de la mecánica bohmiana, sobre la que hemos estado intentando descifrar su estatus metafísico, en realidad sólo es “una descripción abstracta e indirecta de un conjunto de funciones de onda de una partícula en el espacio físico” (Norsen, Marian, & Oriols, 2015, pág. 3129). Es decir, la función de onda universal en el espacio de configuración no es un objeto sobre el cual deba preocuparnos su naturaleza metafísica, ya que sólo es una forma de representar un conjunto de objetos físicos que de hecho viven en el espacio tridimensional ordinario. Según esta interpretación, cada partícula bohmiana tiene asociado un campo en el espacio tridimensional —una función de onda de una partícula— que determina la ecuación que guía su trayectoria en dicho espacio. Así, tenemos un realismo del espacio físico ordinario y funciones de onda que son objetos metafísicamente primitivos en ese espacio, lo que podría clasificarse como una metafísica del tipo A.

Para argumentar su punto, los autores recurren al concepto de *función de onda condicional* de la mecánica bohmiana. Estrictamente hablando, la mecánica bohmiana considera un único sistema genuinamente cuántico, a saber, el mundo en su totalidad. Para poder referirse a subsistemas dentro de ese gran sistema, por ejemplo, para hacer predicciones sobre un experimento en el laboratorio, la mecánica bohmiana plantea un mecanismo matemático para obtener lo que se conoce como la *función de onda condicional* del subsistema. Esta función de onda condicional se obtiene a partir de la función de onda universal y las posiciones de las partículas externas al subsistema en cuestión. No es éste el lugar para entrar en detalles sobre este concepto. Lo importante es entender que la propuesta de múltiples funciones de onda lo que hace es tomar a cada partícula del universo como un subsistema bohmiano y definir la supuesta función de onda correspondiente a partir del concepto de función de onda condicional. “Cada función de onda condicional, como depende sólo de la coordenada espacial asociada con la partícula en cuestión, puede ser entendida como una onda que se propaga en el espacio físico” (Norsen, Marian, & Oriols, 2015, pág. 3133).

Como el objetivo es que las funciones de onda de una partícula sean primitivas y no derivadas de la función de onda universal, una vez definidas las funciones de onda condicionales es necesario eliminar cualquier referencia a la función de onda universal dentro de ellas. El problema es que, para hacerlo, los autores tienen que introducir infinitos potenciales de campo asociados a cada partícula, multiplicando desmesuradamente los entes y haciendo de su propuesta algo metafísicamente muy costoso, como ellos mismos aceptan. Para solucionarlo, Norsen *et al.* proponen que es posible aproximar las funciones de onda de una partícula, dejando sólo algunos de los potenciales de la red infinita y eliminando todos los demás. Según ellos, aunque la aproximación tiene como consecuencia que esta *mecánica bohmiana aproximada* no hace exactamente las mismas predicciones que la teoría cuántica estándar, esto no debería considerarse un problema porque dicha aproximación estaría de acuerdo con los datos experimentales —como en el caso de GRW, que no hace exactamente las mismas predicciones que la mecánica cuántica estándar, pero, hasta el momento, las predicciones de ambas teorías son compatibles con los resultados experimentales—. De esta manera, aunque ellos no lo dicen explícitamente, su propuesta resultaría siendo una nueva teoría cuántica, una nueva “interpretación” de la mecánica cuántica, que tendría la virtud de evitar el problema de la misteriosa naturaleza metafísica de la función de onda universal. Presentar una aproximación que funcione bien en todos los casos es algo que Norsen *et al.* todavía tienen en el tintero; así que, al menos hasta que eso suceda, debemos ser cautelosos frente a su teoría.

La posibilidad de plantear una solución tipo A al problema del humeanismo, con base en la interpretación de Norsen *et al.* de la mecánica bohmiana —N funciones de onda en 3D, cada una con infinitos potenciales de campo—, supondría entender al mosaico humeano como compuesto por partículas bohmianas e infinitos potenciales de campo para cada una de ellas en el espacio físico tridimensional ordinario. Como habíamos dicho, el costo de esta solución es demasiado alto, al suponer una multiplicación exagerada de los entes.

¿Existe otra manera de resolver el problema del humeanismo y mantener una metafísica tipo A?

El principal problema al intentar proponer una solución tipo A para la superveniencia humeana es que, como ya se ha dicho, el estado cuántico de sistemas enredados, es decir, su función de onda, es una característica del sistema que no depende de las propiedades intrínsecas de cada uno de los componentes del mismo. En el capítulo III, una de las propuestas que consideré en favor de un realismo de la función de onda en el espacio tridimensional, fue la de entender a la función de onda como una *propiedad*. Esta propuesta que planteé, se derivó de hacer una lectura realista —a partir del esquema de ontología primitiva— de la propuesta de Monton (2013). Recordemos que Monton retoma la regla eigenestado-eigenvalor¹⁰² para afirmar que la función de onda de un sistema cuántico está representando una propiedad de dicho sistema como un todo. Dado que siempre puede ser escrita como el eigenestado de un *observable* —es decir, de una propiedad—, la función de onda de un sistema cuántico ha de entenderse como representando una propiedad física del sistema de N partículas que vive en tres dimensiones, independientemente de que como objeto matemático dicha función pueda ser vista como un campo en el espacio 3N-D.

Aunque no ahonda en esto —porque va más allá de los objetivos de su propuesta—, la interpretación que hace Monton del papel que juega la propiedad representada por la función de onda, parece suponer una postura gobernista de las leyes de la naturaleza:

Regresemos a la mecánica cuántica, ¿qué papel juega esta propiedad que estoy atribuyendo a sistemas de N partículas? La evolución dinámica de un sistema en mecánica cuántica está dada por la ecuación de Schrödinger y la ecuación de Schrödinger usa el estado cuántico de un sistema. ¿Dónde está esta información acerca del estado cuántico representada en el mundo? Según los proponentes de la ontología 3N-dimensional, esta información está representada por el campo de la función de onda en el espacio 3N-dimensional. Yo sostengo, en contraste, que esta información está representada por esta propiedad que el sistema de N partículas

¹⁰² Remitirse al capítulo II para una definición de la regla eigenestado-eigenvalor.

tiene. (Así como la función de onda evoluciona en el tiempo, la propiedad que el sistema de N partículas tiene cambia). (Monton, 2013, pág. 161)

Mi objetivo es retomar la idea de entender a la función de onda como una propiedad de los sistemas cuánticos, pero interpretarla desde una perspectiva humeana del mundo. Para sostener una postura humeanista tipo A desde la mecánica bohmiana, postulo a la función de onda universal como una propiedad física fundamental que hace parte del mosaico humeano en el espacio tridimensional. A primera vista, lo que un humeanista “clásico” podría decir es que, al ser una propiedad no-local —es decir, que no se predica de un punto en el espacio-tiempo, sino de un conjunto de puntos—, la función de onda no puede contar como una propiedad física fundamental de las que componen el mosaico. Pero, como veremos, hay una manera de entender a dicha propiedad que no viola los principios teóricos del humeanismo.

El humeanismo acepta dentro de su metafísica fundamental propiedades intrínsecas *locales* cuya distribución en el espacio-tiempo determina el mosaico humeano. La característica indispensable de dichas propiedades para el humeanista no es precisamente que sean locales, sino que no acarreen ningún tipo de modalidad o conexión necesaria, es decir, no causan nada ni son disposiciones a nada, simplemente caracterizan el punto del mosaico en el que son instanciadas y nada más. Mi propuesta es entender a la función de onda como una propiedad *no-local* de los sistemas cuánticos que no viole este rasgo distintivo de las propiedades humeanas.

Típicamente se ha pensado que la función de onda carga consigo cierto tipo de modalidad. Por ejemplo, en un experimento con dos partículas en un estado cuántico enredado, parece que al medir y “colapsar” la función de onda en una de las partículas —sea como sea que se entienda el “colapso” dentro de la interpretación con la que trabajemos—, instantáneamente esto *causa* el “colapso” de la otra partícula, lo que supondría una forma de *conexión necesaria*. En el caso de la mecánica bohmiana, parece que la función de onda cumple un

papel causal dentro de la ecuación que define la trayectoria de las partículas en el espacio-tiempo, fungiendo como un campo que guía el movimiento de las partículas. Lo que quiero hacer notar es que, si analizamos con una mirada humeana lo que sucede en el mundo, podemos llegar a aceptar que estas características aparentemente modales de la función de onda sólo son un resultado superveniente del mosaico humeano completo y no de la función de onda en sí, si la entendemos como una propiedad de un conjunto de puntos.

Así como Loewer cambió al espacio-tiempo por el espacio $3N$ -dimensional y Esfeld y Callender desconocieron cualquier otro tipo de propiedad física que no fuera la posición en el espacio-tiempo, mi propuesta de solución al problema del humeanismo incluye una modificación a la definición típica del mosaico humeano. Específicamente, nuestro mosaico humeano estará compuesto no sólo por propiedades intrínsecas locales en el espacio-tiempo (como las posiciones de las partículas bohmianas) y las relaciones entre ellas, sino también por propiedades fundamentales no-locales —como la propiedad representada por la función de onda universal— que no implican ningún tipo de conexión necesaria.

La idea es que la propiedad representada por la función de onda es una propiedad que se predica no de un punto en el espacio tridimensional (o en el espacio-tiempo 4-dimensional), sino de un conjunto de puntos en ese mismo espacio. Pensemos, por ejemplo, en la propiedad identificada como la *masa* en un punto. Dicha propiedad puede representarse mediante una función $m(x, y, z)$ que asigna un valor de los números reales (\mathbb{R}) a cada punto (x, y, z) en el espacio tridimensional (\mathbb{R}^3). Lo anterior puede escribirse como: $m(x, y, z): \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$. Análogamente, la propiedad representada por la función de onda se asignaría mediante una función $\psi(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, \dots, x_N, y_N, z_N): \mathbb{R}^{3N} \rightarrow \mathbb{C}$, es decir, la función ψ asigna un valor de los números complejos (\mathbb{C}) a un conjunto de N puntos $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), \dots, (x_N, y_N, z_N)$ en el espacio tridimensional. Cuando se construya el sistema axiomático que mejor describe un mosaico que contiene este

tipo de propiedad, las leyes de la mecánica bohmiana pueden o no resultar siendo un teorema de dicho sistema.

Recordemos que la tesis de superveniencia humeana está inscrita dentro de un proyecto metafísico más general: el realismo modal de David Lewis.¹⁰³ Dentro de ese proyecto, uno de los supuestos fundamentales, además de la tesis de superveniencia humeana, es el cumplimiento del *principio de recombinación*. El principio de recombinación es la versión lewisiana de la idea de Hume de que no existen conexiones necesarias entre objetos, propiedades o sucesos:

Para expresar la plenitud de mundos posibles, requiero un *principio de recombinación*, según el cual, si tomamos partes de mundos distintos y las juntamos, obtenemos otro mundo posible. Dicho en términos generales, el principio sostiene que cualquier cosa puede coexistir con cualquier otra, al menos si suponemos que ocupan distintas posiciones espaciotemporales. De manera similar, cualquier cosa puede no coexistir con cualquier otra. (Lewis, 2015 [1986a], pág. 231).

Otra forma de resumir el principio de recombinación es la siguiente: “si cualesquiera objetos a y b existen en los mundos M_1 y M_2 , entonces cualesquiera objetos c y d , que son duplicados de a y b , respectivamente, coexisten en M_3 ” (García-Ramírez, 2015, pág. 45). Así pues, según el principio de recombinación, las propiedades físicas fundamentales de nuestro mundo pueden distribuirse de cualquier forma en el espacio-tiempo de otros mundos posibles. Esto garantiza que no existen conexiones necesarias entre dichas propiedades y es, por lo tanto, una de las condiciones que debe cumplir la propiedad postulada en mi propuesta para que valga como una solución al problema que enfrenta la tesis de superveniencia humeana.

En la tabla 2 presento una serie de posibles mundos en los que la propiedad representada por la función de onda universal y las posiciones de las partículas bohmanas se distribuyen temporalmente de formas diferentes, dando o no lugar a las leyes de la mecánica bohmiana.

¹⁰³ Ver la introducción a este trabajo.

Mundo	Propiedad	
	Ψ (función de onda)	Q (posiciones)
ω_1	Schrödinger	Ecuación guía
ω_2	Schrödinger	No-Ecuación guía
ω_3	No-Schrödinger	Ecuación guía
ω_4	No-Schrödinger	No-Ecuación guía

Tabla 2. Ejemplos de recombinación de las propiedades físicas fundamentales Ψ y Q.

Supongamos que vivimos en el mundo ω_1 , un mundo en el que la propiedad representada por la función de onda (Ψ) y las posiciones de las partículas (Q) están distribuidas de tal manera que el mejor sistema axiomático que describe dicho mundo tiene como teoremas tanto a la ecuación de Schrödinger —que resume la distribución de la propiedad Ψ en el mosaico completo (espacio-tiempo) de ω_1 —, como a la ecuación guía bohmiana —que resume el comportamiento de las trayectorias de las partículas en dicho mosaico—. Que el teorema que describe la trayectoria de las partículas en este mundo resulte incluir a la propiedad Ψ es una mera casualidad y no supone ninguna conexión necesaria entre las partículas que instancian dicha propiedad no-local; simplemente es el caso que, al axiomatizar la descripción del mosaico, el sistema más simple e informativo se obtiene planteando tal teorema, lo que no dice nada acerca de la naturaleza de las propiedades que conforman el mosaico, incluida la propiedad Ψ . Para convencerse de ello, bien vale la pena considerar otros mundos posibles.

Supongamos un mundo ω_2 en el que la distribución de la propiedad Ψ en el mosaico puede resumirse a través la ecuación de Schrödinger, pero en el que las trayectorias de las partículas no se resumen a través de la ecuación guía bohmiana, sino con otro teorema, según sea su distribución en ese mosaico. Éste

es un mundo posible en el que tenemos a la propiedad no-local Ψ , pero la teoría bohmiana no lo describe. Las propiedades físicas fundamentales se han re combinado de tal forma que las leyes supervenientes son distintas a las de nuestro mundo. Igualmente sucede con los mundos ω_3 y ω_4 . En dichos mundos existe la propiedad fundamental Ψ , pero se ha distribuido de manera diferente a la de nuestro mundo; la ecuación de Schrödinger ya no resulta una buena descripción de su distribución en el mosaico y, por lo tanto, no superviene como una ley a partir del mejor sistema que describe a tales mundos¹⁰⁴. Esto no debe resultar misterioso de ninguna manera, pues es el mismo principio que aplica para suponer que si la relación entre la masa y la posición de un objeto en el tiempo fuera diferente, las leyes de la mecánica clásica serían diferentes.

Cuando se habla de propiedades fundamentales no-locales o distribuidas, una de las inquietudes que parece levantarse es que dichas propiedades implican conexiones necesarias entre los elementos base de su instanciación. El hecho de que una propiedad requiera de dos o más puntos en el espacio para ser instanciada lleva a algunos a pensar que hay algún tipo de conexión necesaria entre tales puntos, quizá porque asumen que si se acepta la existencia de dicha propiedad:

(1) se niega la posibilidad de que exista un mundo en el que los equivalentes de tales puntos existan, pero no se instancie en ellos la propiedad en cuestión, o

(2) los puntos que instancian dicha propiedad permanecen “ligados” en el tiempo por esa propiedad.

Ambas suposiciones son incorrectas. El hecho de que una propiedad se instancie en múltiples puntos en un instante dado no implica ninguna conexión necesaria entre esos puntos ni en ése ni en ningún otro instante. Así como

¹⁰⁴ Incluso podríamos imaginar que en un uno de estos mundos posibles la propiedad Ψ no está distribuida sobre conjuntos de puntos espaciales simultáneos en el tiempo.

podemos pensar en mundos posibles diferentes al nuestro en los que la masa del electrón no es $9,101 \times 10^{-31}$ kg, sino 400 kg; o mundos en los que los electrones no tienen masa; o mundos en los que los electrones tienen masa de $9,101 \times 10^{-31}$ kg hasta 2050 y de 400 kg a partir de 2051; también podemos pensar en mundos en los que la propiedad representada por la función de onda en un momento específico no es $\psi(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, \dots, x_N, y_N, z_N) = c_1$ (como en nuestro mundo), sino $\psi(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, \dots, x_N, y_N, z_N) = c_2$; o mundos en los que no se instancia ninguna propiedad no-local como la representada por la función de onda en nuestro mundo (negación del supuesto (1)); o mundos en los que la propiedad representada por la función de onda se instancia hasta 2050 y no se instancia a partir de 2051 (negación del supuesto (2)); o mundos como ω_3 y ω_4 en los que el valor de la propiedad representada por la función de onda no evoluciona de acuerdo a Schrödinger, sino de acuerdo a alguna otra ley (negación del supuesto (2)).

Lo que quiero señalar al mencionar todas estas posibilidades es que incluir propiedades físicas fundamentales no-locales dentro del mobiliario del mundo es perfectamente compatible con el principio de recombinación por el que se afirma que “cualquier cosa puede coexistir con cualquier otra y cualquier cosa puede no coexistir con cualquier otra”. Dado que, como dije anteriormente, el cumplimiento del principio de recombinación es lo que garantiza que no existan conexiones necesarias, mostrar que las propiedades fundamentales no-locales respetan el principio de recombinación constituye un argumento suficiente para defender que la existencia de propiedades fundamentales no-locales no implica conexiones necesarias.

Así pues, aunque el tipo de mosaico humeano con el que nos vamos a comprometer de ahora en adelante admite algo más que sólo propiedades intrínsecas locales, ha quedado claro que esto no involucra ningún tipo de conexión necesaria ni acción modal misteriosa: justo lo que se busca en una metafísica naturalista como la que me propuse mantener al inicio de este trabajo.

Dado que el mosaico humeano se ha extendido para admitir no sólo lo que ya admitía el humanismo “clásico”, sino también propiedades fundamentales no-locales, nos podemos referir a esta nueva forma de concebir la tesis de superveniencia humeana como *humeanismo extendido*. Ahora bien, si dentro de esas propiedades fundamentales no-locales se encuentra la propiedad representada por la función de onda de la mecánica cuántica, podríamos, para referencia, llamarlo *humeanismo cuántico*.

La adopción del *humeanismo cuántico* supone algunas ventajas con respecto a las otras propuestas de solución al problema de la superveniencia humeana que hemos estudiado en este capítulo. Por un lado, a diferencia de las posturas tipo B y D, no nos estamos comprometiendo con un espacio físico fundamental altamente dimensional que vaya en contra de nuestras intuiciones más arraigadas; y, por el otro, a diferencia de las posturas tipo C, no estamos despojando al mundo de todas las propiedades físicas fundamentales diferentes a la de “ocupación puntual”. Como vimos, un punto ocupado del espacio-tiempo sin ninguna otra propiedad que lo caracterizara resultaba, al menos, sospechoso. Con el *humeanismo cuántico* los puntos ocupados del espacio-tiempo ya no están desprovistos de propiedades, pues la propiedad representada por la función de onda se predica del conjunto total de puntos “ocupados” del mosaico; las leyes de la mecánica bohmbiana supervienen como teoremas del mejor sistema y podemos dormir tranquilos en un mundo libre de propiedades modales metafísicamente fundamentales.

4. Sumario

En el presente capítulo se han estudiado un rango de posibles soluciones al problema que la mecánica cuántica le impone a la tesis de superveniencia humeana. Para hacerlo, identifiqué inicialmente tres criterios de evaluación que me sirvieron como guía para estudiar la naturaleza metafísica de la función de onda. En la tabla 3 presento un resumen de las propuestas analizadas en este

capítulo, todas ellas dirigidas a reconciliar la tesis de superveniencia humeana con la mecánica cuántica, tomando como base científica la mecánica bohmiana.

Espacio físico Función de onda	3-dimensional	3N-dimensional
Fundamental	<ul style="list-style-type: none"> • Norsen <i>et al.</i> • <i>Humeanismo cuántico</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Loewer
Superveniente	<ul style="list-style-type: none"> • Esfeld • Callender • Bhogal & Perry 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Loewer*</i>

Tabla 3. Resumen de propuestas para un humeanismo compatible con mecánica cuántica.

La clasificación de las posturas de diversos autores con base en los criterios de evaluación definidos me permitió identificar un tipo de solución poco explorado al problema del humeanismo, a saber, defender un realismo del espacio tridimensional con un primitivismo de la función de onda. El estudio de las propuestas sobre la mesa para resolver el problema en cuestión y la identificación de sus fortalezas y debilidades me ha permitido abrir el camino para proponer lo que he llamado *humeanismo cuántico*. El *humeanismo cuántico* muestra que, para salvar a la tesis de superveniencia humeana de los retos que le impone el éxito de la mecánica cuántica, no es necesario comprometernos con un realismo del espacio de configuración en el que viva la función de onda como un campo físico, pues hay una manera de entender a la función de onda como representando un beable no-local dentro del espacio físico ordinario, a saber, como una propiedad de un conjunto de puntos en el espacio tridimensional.

Si bien la construcción de la propuesta presentada se hizo a partir de la mecánica bohmiana, si tenemos en cuenta que GRW admite también una lectura de ontología primitiva —por ejemplo, la versión de GRW con ontología de densidad de masa vista en el capítulo II—, podemos suponer que es posible hacer una interpretación metafísica de dicha teoría en la que la función de onda

aparezca como una propiedad no-local y la ley que da lugar al colapso objetivo supervenga del mosaico espaciotemporal. En este caso, un elemento interesante a analizar sería el de la interpretación del elemento estocástico como superveniente del mosaico humeano.

Ahora bien, si extrapolamos la característica fundamental del *humeanismo cuántico* para que la tesis de superveniencia humeana incluya, en general, propiedades fundamentales no-locales —no sólo la representada por la función de onda— llegamos a lo que he llamado *humeanismo extendido*. Al admitir propiedades fundamentales no-locales dentro del mosaico, el *humeanismo extendido* logra salvar algunas intuiciones acerca de la metafísica fundamental del mundo, en particular: que el espacio físico fundamental es el espacio tridimensional; que dentro del mobiliario del mundo se incluyen propiedades físicas fundamentales y que no existen las conexiones necesarias. La ventaja de postular el *humeanismo cuántico* como un caso particular del *humeanismo extendido* es que, aunque la mecánica cuántica resulte refutada, la nueva tesis de superveniencia humeana puede seguir sosteniéndose frente a la evidencia empírica que, independientemente de la teoría, nos advierte de la existencia de fenómenos fundamentales no-locales.

CONCLUSIONES

La tesis de *superveniencia humeana* es la base de un proyecto metafísico particularmente prometedor, a saber, el realismo modal de David Lewis. De ser sostenible, el proyecto de Lewis permitiría dar cuenta de una amplia gama de problemas filosóficos en torno a nociones como las de significado, modalidad, causalidad, verosimilitud, entre muchas otras. Dado esto, en la introducción a este trabajo me puse como objetivo encontrar una solución al reto que la teoría de la mecánica cuántica le impone a la tesis de superveniencia humeana. Para lograrlo realicé un estudio detallado tanto de la tesis de superveniencia humeana, como de la mecánica cuántica y sus implicaciones metafísicas, lo que al final de esta investigación resultó en lo que llamé un *humeanismo extendido*.

La propuesta del *humeanismo extendido* consiste, en pocas palabras, en extender la base metafísica humeana del mundo para que incluya no sólo propiedades fundamentales locales, sino también propiedades fundamentales no-locales. La razón para postular la existencia de propiedades fundamentales no-locales surge al intentar dar una respuesta satisfactoria al problema de la interpretación metafísica de la *función de onda*.

Para solucionar el problema que la teoría cuántica le imponía a la tesis de superveniencia humeana era indispensable adoptar una interpretación metafísica de dicha teoría. Dado que no existe una interpretación en este sentido ampliamente aceptada como correcta, entonces, para resolver el problema de la superveniencia humeana era necesario resolver también el problema de la interpretación metafísica de la mecánica cuántica y, en particular, del estatus metafísico de la función de onda.

Asumiendo un compromiso naturalista en el desarrollo de esta investigación, encontré que la resolución de los dos problemas mencionados se

delimitaba mutuamente, es decir, no sólo era el caso que para resolver el problema de la superveniencia humeana era necesaria una interpretación metafísica satisfactoria de la función de onda, sino que para encontrar esa interpretación metafísica satisfactoria era útil tener en cuenta la tesis de superveniencia humeana. Con esta metodología llegué a la conclusión de que la mejor manera de entender metafísicamente a la función de onda es como una *propiedad no-local* de los sistemas cuánticos que viven en un *espacio físico fundamental tridimensional*.

La idea, ahora, a manera de síntesis, es retomar la tesis de superveniencia humeana de Lewis y reformularla a la luz del humanismo extendido.

Antes que nada, recordemos la formulación paradigmática de Lewis de la tesis de superveniencia humeana:

[...] Tenemos la geometría: un sistema de relaciones externas de distancia espacio-temporal entre puntos. Quizá puntos del espacio-tiempo mismo, quizá bits de materia o campos de éter de tamaño puntual, quizá ambos. Y en esos puntos tenemos cualidades locales: propiedades intrínsecas perfectamente naturales que no necesitan nada más grande que un punto en el cual ser instanciadas. En resumen: tenemos un arreglo de cualidades. Y eso es todo. Todo lo demás sobreviene a eso. (Lewis, 1986b, pág. x)

Uno de los supuestos que asume la tesis de superveniencia humeana es que las propiedades fundamentales —perfectamente naturales— son propiedades locales. Es justo ahí donde radica la discordancia con la mecánica cuántica. Aunque inicialmente, en 1986, Lewis quiso mantener este supuesto con respecto a las propiedades fundamentales, para 1994 ya aceptaba que era posible que fuera necesario reformular de alguna manera la tesis de superveniencia humeana:

La visión [de la tesis de superveniencia humeana] está inspirada en la mecánica clásica. [...] Pero si tenemos en cuenta la física, es mejor que recordemos que la física no es realmente clásica. Por ejemplo, una visión rival inspirada por ondas en el espacio de estado puede decir que muchas propiedades fundamentales están instanciadas no en puntos, sino en tuplas de puntos. [...] si defiendiendo la sostenibilidad *filosófica* de la Superveniencia humeana, esa defensa puede, sin duda, adaptarse a cualquier tesis de superveniencia mejor que pueda surgir de una mejor física. (Lewis, 1994, pág. 474)

Así pues, esta investigación ha estado en concordancia con las aspiraciones naturalistas de Lewis con respecto a que la defensa de la tesis de superveniencia humeana pudiera adaptarse a los avances de la física fundamental. Ahora bien, para adaptar correctamente la tesis de superveniencia humeana es necesario tener en cuenta su dependencia del principio de recombinación, pues este principio es el que da lugar a la diversidad de mundos posibles que requiere el proyecto del realismo modal. Una de las maneras en las que Lewis plantea dicho principio es la siguiente:

Para expresar la plenitud de mundos posibles, requiero un *principio de recombinación* según el cual, si tomamos partes de mundos distintos y las juntamos, obtenemos otro mundo posible. Dicho en términos generales, el principio sostiene que cualquier cosa puede coexistir con cualquier otra, al menos si suponemos que ocupan distintas posiciones espaciotemporales. De manera similar, cualquier cosa puede no coexistir con cualquier otra. (Lewis, 2015 [1986a], pág. 231)

Lo que el principio de recombinación establece, en otras palabras, es que cualquier distribución espacio-temporal de propiedades fundamentales es posible. Dicho principio no dice nada con respecto a la naturaleza metafísica de las propiedades fundamentales; no especifica si deben ser locales o no, simplemente afirma que las propiedades físicas fundamentales, sean las que sean, pueden combinarse de cualquier manera, lo que garantiza que no existan conexiones necesarias. Con el ejercicio de imaginación de mundos posibles planteado en el último capítulo de mi investigación, mostré que la propiedad no-local representada por la función de onda puede distribuirse en el espacio y en el tiempo de infinitos mundos posibles de infinitas formas distintas, de manera que en muchos de ellos la ecuación de Schrödinger no supervendría como una ley.

Que haya mundos en los que las leyes de la mecánica cuántica no supervienen al mosaico humeano es precisamente lo que la postura regularista acerca de leyes de Lewis quiere asegurar. La distribución de propiedades en nuestro mundo hace que haya regularidades que se pueden resumir en un

sistema axiomático que contiene, presumiblemente, a las leyes de la mecánica cuántica como teoremas, pero eso no quiere decir que ésta fuera la única forma en la que esas propiedades podrían haberse distribuido —incluida la propiedad no-local representada por la función de onda—. Las leyes de la naturaleza no son necesarias ni fundamentales, sino que supervienen de la configuración total del mosaico humeano de cada mundo posible.

Así pues, queda claro que la introducción de propiedades fundamentales no-locales dentro de la base metafísica del mundo no requiere ninguna modificación del principio de recombinación y podemos concentrarnos, ahora, en la reformulación de la tesis de superveniencia humeana para que incluya este tipo de propiedades. Parafraseando la formulación de la tesis de superveniencia humeana citada hace poco, tendríamos:

[Nueva tesis de superveniencia humeana] Tenemos la geometría: un sistema de relaciones externas de distancia espacio-temporal entre puntos. Quizá puntos del espacio-tiempo mismo, quizá bits de materia o campos de éter de tamaño puntual, quizá ambos. Y en esos puntos tenemos cualidades fundamentales: propiedades intrínsecas perfectamente naturales que son instanciadas en un punto o en un conjunto de puntos, según sea el caso. En resumen: tenemos un arreglo de cualidades. Y eso es todo. Todo lo demás superviene a eso.

Al habernos asegurado de que las nuevas propiedades que vamos a admitir dentro de la base de superveniencia cumplen con el principio de recombinación, el espíritu humanista de la tesis de superveniencia humeana se mantiene a la vez que está en consonancia con la teoría cuántica. De esta manera, puede declararse como superado el problema que la mejor ciencia actual parecía estar imponiéndole al proyecto metafísico de Lewis.

BIBLIOGRAFÍA

- Aicardi, F., Borsellino, A., Ghirardi, G., & Grassi, R. (1991). Dynamic models for state-vector reduction— Do they ensure that measurements have outcomes? *Foundations of Physics Letters*, 4: 109-128.
- Albert, D. Z. (1992). *Quantum Mechanics and Experience*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Albert, D. Z. (1996). Elementary quantum metaphysics. En J. T. Cushing, & S. Fine A. & Goldstein, *Bohmian mechanics and quantum theory: an appraisal* (págs. 277-84). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Albert, D. Z. (2013). Wave Function Realism. En A. Ney, & D. Z. Albert, *The Wave Function: Essays on the Metaphysics of Quantum Mechanics* (págs. 52-57). New York: Oxford University Press.
- Allen, S. (2012). What Matters in (Naturalized) Metaphysics? *Essays in Philosophy*, 13: 211-241.
- Allori, V. (2013). Primitive Ontology and the Structure of Fundamental Physical Theories. En A. Ney, & D. Z. Albert, *The Wave Function: Essays on the Metaphysics of Quantum Mechanics* (págs. 58-75). New York: Oxford University Press.
- Allori, V. (2015). Primitive Ontology in a Nutshell. *International Journal of Quantum Foundations*, 1 (3): 107-122.
- Allori, V., Goldstein, S., Tumulka, R., & Zanghì, N. (2008). On the Common Structure of Bohmian Mechanics and the Ghirardi-Rimini-Weber Theory. *The British Journal for the Philosophy of Science*, 59 (3): 353-389.
- Armstrong, D. (1978). *A Theory of Universals*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Armstrong, D. (1983). *What Is a Law of Nature?* Cambridge: Cambridge University Press.
- Armstrong, D. (1993). The Identification Problem and the Inference Problem. *Philosophy and Phenomenological Research*, 53 (2): 421-422.
- Bell, J. (1964). On the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox. *Physics*, 1 (3): 195-200.
- Bell, J. (1975). The theory of local beables. *Epistemological Letters*.
- Bell, J. (1987). Are there quantum jumps? En C. Kilmister, *Schrödinger—Centenary Celebration of a Polymath*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Bell, J. (1987). *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Belot, G. (2012). Quantum states for primitive ontologists. *European Journal for Philosophy of Science*, 2 (1):67-83.
- Bhogal, H., & Perry, Z. R. (2015). What the Humean Should Say About Entanglement. *Noûs*, 51 (1): 74-94.

- Bird, A. (2007). *Nature's Metaphysics. Laws and Properties*. Oxford: Oxford University Press.
- Black, R. (2000). Against Quidditism. *Australasian Journal of Philosophy*, 78 (1): 87–104.
- Bohm, D. (1952). A suggested interpretation of the quantum theory in terms of "hidden" variables. *Physical Review*, 85 (2): 166-ss.
- Born, M., & Einstein, A. (1971). *The Born-Einstein Letters*. New York: Walker and Co.
- Callender, C. (2015). One World, One Beable. *Synthese*, 192 (10): 3153–3177.
- Callender, C. (2015). One World, One Beable. *Synthese*, 192 (10): 3153–3177.
- Carroll, J. (1994). *Laws of Nature*. Cambridge University Press.
- Carroll, J. (2016). Laws of Nature. En E. N. Zalta, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (págs. URL = <https://plato.stanford.edu/archives/fall2016/entries/laws-of-nature/>). Metaphysics Research Lab, Stanford University.
- Cartwright, N. (1983). *How the Laws of Physics Lie*. Oxford University Press.
- Chakravarty, A. (2007). *A Metaphysics for Scientific Realism. Knowing the Unobservable*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Chen, E. K. (2019). Realism about the wave function. *Philosophy Compass*, 14 (7).
- de Broglie, L. (1927). La structure atomique de la matière et du rayonnement et la mécanique ondulatoire. *C. R. Acad. Sci.*, 184: 273-274.
- DeWitt, B. S. (1970). Quantum Mechanics and Reality. *Physics Today*, 23: 30–35.
- Dorato, M., & Esfeld, M. (2015). The Metaphysics of Laws: Dispositionalism vs. Primitivism. En T. Bigaj, & C. Wutrich, *Metaphysics in Contemporary Physics* (págs. 403-424). Brill/Rodopi.
- Dretske, F. (1977). Laws of Nature. *Philosophy of Science*, 44 (2): 248–268.
- Dürr, D., Goldstein, S., & Zanghì, N. (1992). Quantum Equilibrium and the Origin of Absolute Uncertainty. *Journal of Statistical Physics*, 67 (5): 843–907.
- Dürr, D., Goldstein, S., & Zanghì, N. (1997). Bohmian mechanics and the meaning of the wave function. En R. S. Cohen, M. Horne, & J. Stachel, *Experimental metaphysics—quantum mechanical studies for Abner Shimony; Boston studies in the philosophy of science* (págs. 193: 25–38). Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Einstein, A., Podolsky, B., & Rosen, N. (1935). Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? *Physical Review*(47), 47 (10): 777–780.
- Ellis, B. (2001). *Scientific Essentialism*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Ellis, B. (2002). *The Philosophy of Nature: A Guide to the New Essentialism*. Chesham: Acumen.
- Esfeld, M. (2014). Quantum Humeanism, or: physicalism without properties. *The Philosophical Quarterly*, 64: 453-470.

- Everett, H. (1957). Relative State Formulation of Quantum Mechanics. *Review of Modern Physics*, 29: 454–462.
- French, S. (1998). On the Withering Away of Physical Objects. En E. Castellani, *Interpreting Bodies: Classical and Quantum Objects in Modern Physics* (págs. 93-113). Princeton: Princeton University Press.
- French, S. (2006). Structure as a Weapon of the Realist. *Proceedings of the Aristotelian Society*, 106 (1): 170–187.
- French, S. (2014). *The Structure of the World: Metaphysics and Representation*. Oxford: Oxford University Press.
- García-Ramírez, E. (2015). Estudio introductorio. El realismo modal como metafísica naturalista. En D. Lewis, *Sobre la pluralidad de mundos* (págs. 5-96). Ciudad de México: UNAM-IIFs.
- Ghirardi, G. (2018). Collapse Theories. En E. N. Zalta, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (págs. URL=<https://plato.stanford.edu/archives/fall2018/entries/qm-collapse/>). Metaphysics Research Lab, Stanford University.
- Ghirardi, G., Grassi, R., & Benatti, F. (1995). Describing the macroscopic world—Closing the circle within the dynamical reduction program. *Foundations of Physics*, 25: 5-38.
- Ghirardi, G., Rimini, A., & Weber, T. (1986). Unified dynamics for microscopic and macroscopic systems. *Physical Review D*, 34 (2): 470-491.
- Goldstein, S. (1998). Quantum Theory without Observers. *Physics Today*, 51 (3): 42-46.
- Goldstein, S. (2017). Bohmian Mechanics. En E. N. Zalta, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (págs. URL = <https://plato.stanford.edu/archives/sum2017/entries/qm-bohm/>). Metaphysics Research Lab, Stanford University.
- Goldstein, S., & Teufel, S. (2001). Quantum spacetime without observers: Ontological clarity and the conceptual foundations of quantum gravity. En C. Callender, & N. Huggett, *Physics Meets Philosophy at the Planck Scale* (págs. 275–289). Cambridge: Cambridge University Press.
- Goldstein, S., & Zanghì, N. (2013). Reality and the Role of the Wave Function in Quantum Theory. En A. Ney, & D. Z. Albert, *The Wave Function: Essays on the Metaphysics of Quantum Mechanics* (págs. 91-109). New York: Oxford University Press.
- Holland, P. R. (1993). *The quantum theory of motion*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Hubert, M., & Romano, D. (2018). The wave-function as a multi-field. *European Journal for Philosophy of Science*, 8 (3):521–537.
- Hylton, P., & Kemp, G. (2020). Willard Van Orman Quine. En E. N. Zalta, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (pág. URL =

- <<https://plato.stanford.edu/archives/spr2020/entries/quine/>>. Metaphysics Research Lab, Stanford University.
- Ismael, J. (2015). Quantum Mechanics. En E. N. Zalta, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (pág. <https://plato.stanford.edu/archives/spr2015/entries/qm/>). Metaphysics Research Lab, Stanford University.
- Janssen-Lauret, F. (2017). The Quinean Roots of Lewis's Humeanism. *The Monist*, 100 (2): 249-265.
- Ladyman, J. (1998). What is Structural Realism? *Studies in History and Philosophy of Science*, 29: 409–424.
- Ladyman, J. (1998). What is Structural Realism? *Studies in History and Philosophy of Science*, 29: 409–424.
- Ladyman, J., & Ross, D. (2007). *Every Thing Must Go*. New York: Oxford University Press.
- Lewis, D. (1973). Causation. *Journal of Philosophy*, 70 (17): 556–567.
- Lewis, D. (1983). New Work for a Theory of Universals. *Australian Journal of Philosophy*, 61 (4): 343–377.
- Lewis, D. (1986a). *On the Plurality of Worlds*. New York: Basil Blackwell.
- Lewis, D. (1986b). *Philosophical Papers, Vol. ii*. Oxford: Oxford University Press.
- Lewis, D. (1994). Humean Supervenience Debugged. *Mind*, 103 (412): 473-490.
- Lewis, D. (2015 [1986a]). *Sobre la pluralidad de mundos*. Ciudad de México: Instituto de Investigaciones Filosóficas UNAM.
- Loewer, B. (2004). Humean Supervenience. En J. Carroll, *Readings on Laws of Nature* (págs. 176-206). Pittsburgh: University of Pittsburgh Press.
- Maudlin, T. (1995). Three measurement problems. *Topoi*, 14(1), 14 (1): 7-15.
- Maudlin, T. (2007). *The Metaphysics Within Physics*. New York: Oxford University Press.
- Maudlin, T. (2013). The Nature of the Quantum State. En A. Ney, & D. Z. Albert, *The Wave Function: Essays on the Metaphysics of Quantum Mechanics* (págs. 126-153). New York: Oxford University Press.
- Mill, J. S. (1947 [1843]). *A System of Logic*. London: Longmans, Green and Co.
- Monton, B. (2006). Quantum mechanics and 3N-dimensional space. *Philosophy of Science*, 73 (5): 778–789.
- Monton, B. (2013). Against 3N-Dimensional Space. En A. Ney, & D. Z. Albert, *The Wave Function: Essays on the Metaphysics of Quantum Mechanics* (págs. 154-167). New York: Oxford Press University.
- Mumford, S. (2004). *Laws in Nature*. London: Routledge.
- Mumford, S. (2005). Laws and Lawlessness. *Synthese*, 144 (3): 397–413.

- Ney, A. (2013). Introduction. En A. Ney, & D. Z. Albert, *The Wave Function: Essays on the Metaphysics of Quantum Mechanics* (págs. 1-51). New York: Oxford University Press.
- Nolan, D. (2016). Method in Analytic Metaphysics. En H. Cappelen, T. S. Gendler, J. Hawthorne, & D. Sgaravatti, *The Oxford Handbook of Philosophical Methodology* (págs. 159-176). Oxford: Oxford University Press.
- Norsen, T., Marian, D., & Oriols, X. (2015). Can the wave function in configuration space be replaced by single-particle wave functions in physical space? *Synthese*, 192 (10): 3125-3151.
- Orilia, F., & Swoyer, C. (2020). Properties. En E. N. Zalta, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (pág. <https://plato.stanford.edu/archives/spr2020/entries/properties>). Metaphysics Research Lab, Stanford University.
- Papineau, D. (2016). Naturalism. En E. N. Zalta, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (pág. <https://plato.stanford.edu/archives/win2016/entries/naturalism/>). Metaphysics Research Lab, Stanford University. Obtenido de The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Winter 2016 Edition), Edward N. Zalta (ed.): <<https://plato.stanford.edu/archives/win2016/entries/naturalism/>>
- Paul, L. A. (2012). Metaphysics as modeling: the handmaiden's tale. *Philosophical Studies: An International Journal for Philosophy in the Analytic Tradition*, Vol. 160, No. 1, 1-29.
- Pusey, M. F., Barrett, J., & Rudolph, T. (2012). On the reality of the quantum state. *Nature Physics*, 8: 475–478.
- Quine, W. V. (1957). The Scope and Language of Science. *The British Journal for the Philosophy of Science* 8, no. 29, 1–17.
- Ramsey, F. (1978 [1928]). *Foundations*. London: Routledge and Kegan Paul.
- Reichenbach, H. (1947). *Elements of Symbolic Logic*. New York: Macmillan Co.
- Ross, D., Ladyman, J., & Kincaid, H. (2013). *Scientific Metaphysics*. Oxford: Oxford University Press.
- Saunders, S., & Wallace, D. (2008). Branching and Uncertainty. *British Journal for the Philosophy of Science*, 59: 293–305.
- Saunders, S., Barrett, J., Kent, A., & Wallace, D. (2010). *Many Worlds? Everett, Quantum Theory, and Reality*. Oxford: Oxford University Press.
- Schrenk, M. (2017). *Metaphysics of Sciences. A systematic and Historical Introduction*. New York: Routledge.
- Schrödinger, E. (1935). Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik. *Naturwissenschaften*, 23(48), 23 (48): 807-812.
- Scriven, M. (1961). The Key Property of Physical Laws – Inaccuracy. *Current Issues in the Philosophy of Science – Proceedings of Section L of the American Association*

- for the Advancement of Sciences, 1959* (págs. 91-104). New York: Holt Rinehart and Winston.
- Sellars, W. (1971). *Ciencia, percepción y realidad*. Madrid: Tecnos.
- Shoemaker, S. (1982). Causality and Properties. En S. Shoemaker, *Identity, Cause, and Mind*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Spekkens, R. W. (2015). Quasi-Quantization: Classical Statistical Theories with an Epistemic Restriction. En G. Chiribella, & R. W. Spekkens, *Quantum Theory: Informational Foundations and Foils* (págs. 83-135). Berlín: Springer.
- Swartz, N. (1985). *The Concept of Physical Law*. New York: Cambridge University Press.
- Swartz, N. (2020). Laws of Nature. En *The Internet Encyclopedia of Philosophy* (pág. <https://www.iep.utm.edu/>). ISSN 2161-0002.
- Tooley, M. (1977). The Nature of Laws. *Canadian Journal of Philosophy*, 7 (4): 667–698.
- Tooley, M. (1987). *Causation: A Realist Approach*. Oxford: Clarendon Press.
- Tumulka, R. (2006). A relativistic version of the Ghirardi-Rimini-Weber model. *Journal of Statistical Physics*, 125: 825-844.
- Vaidman, L. (2012). Probability in the Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics'. En Y. Ben-Menahem, & M. Hemmo, *Probability in Physics The Frontiers Collection XII* (págs. pp. 299–311.). Springer.
- Van Fraassen, B. (1980). *The Scientific Image*. Oxford: Oxford University Press.
- Van Fraassen, B. (1989). *Laws and Symmetries*. Oxford: Clarendon Press.
- Wallace, D. (2003). Everett and Structure. *History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*(34 B), 34 (1): 87–105.
- 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): 415–438.
- Wallace, D. (2010). Decoherence and Ontology. En S. J. Saunders, *Many Worlds? Everett, Quantum Theory, and Reality* (págs. 53–72). Oxford: Oxford University Press.
- Wallace, D. (2013). A Prolegomenon to the Ontology of the Everett Interpretation. En A. Ney, & D. Z. Albert, *The Wave Function: Essays on the Metaphysics of Quantum Mechanics* (págs. 203-222). New York: Oxford University Press.
- Wallace, D., & Timpson, C. G. (2010). Quantum mechanics on spacetime I: Spacetime state realism. *The British Journal for the Philosophy of Science*, 61 (4): 697–727.
- Williamson, T. (2013). How Deep is the Distinction between A Priori and A Posteriori Knowledge? En A. Casullo, & J. T., *The A Priori in Philosophy* (págs. 291-312). Oxford: Oxford University Press.