Mecánica bohmiana y explicación: el caso de la interpretación de la función de onda

Bohmian mechanics and explanation: the case of the interpretation of the wave function

Mecânica bohmiana e explicação: o caso da interpretação da função de onda

Albert Solé
Albert.sole@ub.edu
Universidad de Barcelona, LOGOS, BIAP, España
0000-0002-1831-579

José A. Díez
Universidad de Barcelona, LOGOS, BIAP, España
0000-0002-1082-6020

→ **Recibido:** 30 / 10 / 2025
→ **Aceptado:** 25 / 11 / 2025
→ **Publicado:** 20 / 01 / 2026

→ **Artículo Dossier**

→ **Cómo citar:** Solé, A., & Díez, J. A. (2025). Mecánica bohmiana y explicación: el caso de la interpretación de la función de onda. *Culturas Científicas*, 6(1), pp. 200-222. doi.org/10.35588/cc.v6d7927

[RESUMEN]

En este artículo abordamos la cuestión acerca de si la mecánica bohmiana provee una explicación científica de los fenómenos y de si su poder explicativo depende de la interpretación de dicha teoría que uno prefiera. Más particularmente, nos centramos en el debate acerca de la naturaleza de la función de onda, considerando tres interpretaciones: (i) que esta representa un campo físico; (ii) que se trata de un aspecto de la ley de movimiento de las partículas y (iii) que representa una propiedad disposicional de las partículas. En un artículo reciente, Esfeld et al. (2014) consideran estas tres alternativas defendiendo que la interpretación disposicional es superior en términos explicativos. Aquí tomamos como herramienta para el análisis la teoría de Díez (2014) de acuerdo con la cual las explicaciones científicas son instancias de subsunciones nomológicas ampliativas y especializadas. Concluimos que la mecánica bohmiana es explicativa y que su capacidad de proveer una explicación científica adecuada de los fenómenos no depende de la interpretación de la teoría, aclarando cómo hay que entender supuestas diferencias de poder explicativo como las invocadas por Esfeld et al. (2014).

[PALABRAS CLAVES]

Mecánica bohmiana, Explicación científica, Función de onda, Poder explicativo, Interpretación nomológica.

[ABSTRACT]

In this article, we address the question of whether Bohmian mechanics provides a scientific explanation of phenomena and whether its explanatory power depends on the chosen interpretation of the theory. More particularly, we focus on the debate concerning the nature of the wave function, considering three interpretations: (i) that it represents a physical field; (ii) that it is an aspect of the particles' law of motion; and (iii) that it represents a dispositional property of the particles. In a recent paper, Esfeld et al. (2014) consider these three alternatives, arguing that the dispositional interpretation is superior in explanatory terms. For our analysis, we use Díez's (2014) account, according to which scientific explanations are instances of ampliative and specialized nomological embeddings. We conclude that Bohmian mechanics is explanatory and that its capacity to provide an adequate scientific explanation of phenomena does not depend on the interpretation of the theory, clarifying how alleged differences in explanatory power, such as those invoked by Esfeld et al. (2014), should be understood.

[KEY WORDS]

Bohmian mechanics, Scientific explanation, Wave function, Explanatory power, Nomological interpretation.

1. Introducción

Los fenómenos cuánticos tienen fama de ser sumamente misteriosos y hasta casi incomprensibles.[1] Esto podría hacer pensar que no se conoce ninguna explicación posible de los mismos. La realidad, sin embargo, es justamente la contraria: se han planteado, no solo una, sino múltiples narrativas que son candidatas a explicarlos. Esto es así porque la mecánica cuántica—el marco que, en principio, debe de proveer de una explicación científica de los fenómenos cuánticos—adolece de un agudo problema de infradeterminación. Existen varias teorías (incluso, familias de teorías) que predicen adecuadamente dichos fenómenos, siendo empíricamente equivalentes o empíricamente indistinguibles por los medios actuales. Como ejemplo, pueden citarse las teorías del colapso de la función de onda, las teorías de los muchos mundos y las teorías de variables ocultas. La infradeterminación se exacerba por el hecho de que, generalmente, cada una de estas teorías admite además varias interpretaciones que difieren en la ontología postulada.

En este contexto, cabe preguntarse qué permite favorecer una teoría o interpretación, si todas ellas tienen el mismo acierto predictivo. En muchos casos, los argumentos planteados en la literatura apelan al *poder explicativo*: típicamente, se argumenta que una teoría o interpretación debe de preferirse porque explica mejor los fenómenos que sus rivales. Un ejemplo reciente de estas disputas interpretativas concierne a la mecánica bohmiana, el miembro más conocido dentro de la familia de teorías de variables ocultas. Según esta teoría, un sistema físico se compone de partículas con posiciones siempre bien definidas. Las trayectorias de las partículas dependen de la función de onda, pero el estatus ontológico de esta última es controvertido. Algunos bohmianos consideran que representa un campo físico real que “guía” a las partículas bohmianas, de modo análogo a cómo un campo electromagnético “guía” a una partícula cargada clásica. Esta propuesta enfrenta dificultades porque no está claro cómo interpretar físicamente ese supuesto “campo”. La función de onda asociada a un sistema de una sola partícula asigna un valor a cada punto del espacio—tal y como hacen los campos clásicos que son candidatos a la reificación; para el caso más general de un sistema de N partículas, su función de onda está definida en un espacio $3N$ dimensional que se conoce como «espacio de configuración» (del sistema). Esto ha llevado a algunos bohmianos a considerar que la función de onda no representa a una sustancia, sino que codifica o captura un aspecto de la ley de movimiento de las partículas: no se trataría de una entidad física como un campo, sino de una entidad “nomológica”. Finalmente, otros han defendido que la función de onda representa una propiedad disposicional de las partículas.[2]

En un influyente artículo, Michael Esfeld, Dustin Lazarovici, Mario Hubert y Detlef Dürr (véase Esfeld *et al*. 2014) abordan en detalle este debate, considerando, además, si la interpretación nomológica de la función de onda es compatible con una concepción humeana de las leyes de la naturaleza. Los autores responden afirmativamente y comparan dicha interpretación con las rivales anteriormente mencionadas, concluyendo que el disposicionalismo debe de ser preferido por su mayor poder explicativo. Es interesante notar, sin embargo, la evolución posterior de Esfeld, el cual ha dejado de defender el disposicionalismo para convertirse en el principal valedor de una versión humeana radical de la propuesta nomológica, denominada

[1] En este artículo, nos centramos en fenómenos cuánticos *no relativistas* y las teorías que los predicen.

[2] Estas tres interpretaciones no son las únicas discutidas en la literatura. Además, cada una de ellas admite diferentes variantes.

«Super-humeanismo.»[3] Del resto de autores, ninguno ha acompañado a Esfeld en su mutación dialéctica; es más, Lazarovici se ha convertido en un crítico feroz del Super-humeanismo.[4]

Los contendientes en esta disputa parecen compartir la presuposición de que el carácter explicativo de una teoría o interpretación adviene en grados y que se trata, por tanto, de una suerte de medida comparativa. Esto suscita la cuestión de cómo evaluar el poder explicativo de una teoría. Por otro lado, conviene advertir que la propia mecánica bohmiana ha sido comparada con teorías rivales en términos explicativos, con veredictos también muy dispares. Así, los partidarios de la teoría típicamente la elogian por ofrecer una mejor explicación de los fenómenos cuánticos que las teorías cuánticas rivales.[5] En cambio, partidarios de teorías no bohmianas han sugerido que las explicaciones bohmianas son parasitarias de las explicaciones de la mecánica cuántica estándar[6] o, incluso, que la teoría no es explicativa en absoluto.[7]

En filosofía general de la ciencia la noción de «explicación científica» ha sido escudriñada con detalle. Como es bien sabido, el debate en su forma contemporánea surge con los trabajos de Carl Hempel, alrededor de los años 50 del siglo XX, articulando el denominado modelo de cobertura legal. Poco después, se desarrollaron enfoques alternativos; entre ellos, los que analizan la noción de explicación científica en término de causalidad y de unificación, respectivamente. El debate se ha ramificado notoriamente, incluso con planteamientos pluralistas que defienden que un solo análisis no es suficiente para subsumir toda la variedad de explicaciones que se plantean en las distintas disciplinas científicas. En este contexto, Díez (2014) ha propuesto recientemente una concepción neo-hempeliana y monista que considera las explicaciones científicas como instancias de subsunciones nomológicas, ampliativas y especializadas ("Ampliative, Specialized nomological Embeddings" en inglés, lo cual da lugar al acrónimo ASE, que usaremos en adelante para referirnos a la teoría).

Volviendo a la cuestión del carácter explicativo de las distintas teorías cuánticas y sus respectivas interpretaciones, sorprende constatar que, en muchos casos, los argumentos empleados apelan a intuiciones pre-teóricas sobre la noción de explicación, pero no se basan en teorías de la explicación científica consolidadas como las que acabamos de mencionar. Este es, precisamente, el caso de Esfeld *et al.* (2014). Lo que pretendemos en este trabajo es subsanar de algún modo esta carencia, usando ASE para clarificar si la mecánica bohmiana es explicativa y si, en efecto, el carácter explicativo depende de la interpretación de la función de onda, como sugieren los autores mencionados. Consideramos al modelo ASE como una buena herramienta para el meta-análisis puesto que, como argumentaremos más adelante, supone un refinamiento del modelo hempeliano que no adolece de sus contraejemplos y que presenta ventajas frente a las propuestas causalista y unificacionista.

El artículo está estructurado de la siguiente manera. En la próxima sección (Sección

[3]Véase, por ejemplo, Esfeld y Deckert (2017) o Esfeld (2020).

[4]Véase, Lazarovici (2018).

[5]Véase, por ejemplo, Durr *et al.* (1992), Holland (1993), Bohm y Hiley (1993), Oriols y Mompart (2019).

[6]Puede considerarse que esta es la posición de Heisenberg, quien criticó a la mecánica bohmiana por tratarse de una "repetición exacta en un lenguaje diferente" de la interpretación de Copenhague (véase Heisenberg 1955, p. 18). También sería la consecuencia ineludible de asumir que la mecánica bohmiana es, en realidad, una teoría de los muchos mundos (véase Brown y Wallace (2005) para una defensa de tesis y Lewis (2007) para una réplica).

[7]Dado el carácter explícitamente no-local de la mecánica bohmiana, si se respalda una concepción causalista de la explicación y se restringe toda causalidad a la causalidad local permitida por la teoría de la relatividad, entonces, podría concluirse que la mecánica bohmiana no ofrece ninguna explicación.

2) presentamos con más detalle la mecánica bohmiana y la disputa interpretativa acerca de la naturaleza de la función de onda en el seno de esta teoría, elaborando el argumento de Esfeld et al. en favor del disposicionalismo. Por consideraciones de espacio, esta es la única disputa interpretativa que consideraremos en nuestro trabajo. En la Sección 3, introducimos el modelo ASE, contextualizándolo y motivándolo. En la Sección 4 usamos ASE para responder a las preguntas cruciales acerca del carácter explicativo de la mecánica bohmiana. Puesto que se trata de discutir si la teoría provee una explicación de los fenómenos, tomaremos como ejemplo el experimento de la doble rendija, pues, según muchos, contiene la quintaesencia de los misterios cuánticos. Mostraremos que el modelo bohmiano de este fenómeno satisface las condiciones que según ASE constituyen una explicación científica satisfactoria y que esto es así independientemente de la interpretación de la función de onda suscrita. Esto, por supuesto, plantea la pregunta muy relevante de cómo entender y concretar el debate sobre las supuestas diferencias explicativas entre interpretaciones. Dedicamos la sección final (Sección 5) a responder esta pregunta, lo que nos lleva, además, a introducir una clarificación importante en relación con el requisito de la ampliatividad en ASE.

Algunos lectores podrían sentirse tentados a considerar que nuestro proyecto carece de interés, ya que estamos tratando con una teoría no relativista y, por lo tanto, con una teoría falsa, y que nadie piensa en una explicación científica válida que incluya leyes falsas en el explanans. No creemos que esta crítica sea justificada. Una buena explicación ha de ser: (i) conceptualmente satisfactoria, esto es, una posible explicación; y (ii) materialmente adecuada, esto es, con explanans verdadero. Tanto ASE como Hempel y muchas otras propuestas alternativas, ofrecen análisis de lo primero (que es lo filosóficamente demandante), es decir, la diferencia entre explicaciones en contraposición a las meras predicciones sin valor explicativo. Por ejemplo, las predicciones no explicativas basadas en las leyes cinemáticas meramente descriptivas de Kepler, frente a las explicativas basadas en las leyes dinámicas de Newton. La diferencia relevante no tiene que ver con la verdad ya que, estrictamente hablando, ambos conjuntos de leyes son falsos. Es esta diferencia lo que ASE intenta capturar y, en el caso que nos ocupa, implica el hecho de que las leyes de Newton son ampliativas y las leyes de Kepler no lo son (más sobre esta distinción a continuación). Lo mismo se aplica a nuestra investigación actual sobre la mecánica bohmiana (no relativista). Lo que nos preguntamos, entonces, es si esta teoría proporciona una explicación científica posible de los fenómenos cuánticos, y si esta explicación depende de la interpretación adoptada. Creemos que esta es la pregunta pertinente en el contexto de las discusiones sobre la filosofía de la mecánica cuántica, que muy a menudo tratan sobre la comparación (en términos explicativos y de otro tipo) de teorías no relativistas.

2. La mecánica bohmiana y la disputa sobre la interpretación de la función de onda

2.1. Mecánica cuántica y mecánica bohmiana

De acuerdo con el enfoque mecánico-cuántico estándar (en adelante, MCE), el estado físico de un sistema cerrado de N partículas se especifica completamente por su función de onda, $\psi(t)$. Si el sistema permanece aislado, la evolución temporal de la función de onda viene dada por la ecuación de Schrödinger (en adelante, ES):

(1) $i\hbar\frac{d\psi(t)}{dt}=\widehat{H}\psi(t)$ (ES)

donde $\hbar$ es la constante de Planck reducida y $\widehat{H}$ es el operador hamiltoniano del sistema específico. Formalmente, $\psi(t)$ es un vector definido en un espacio de Hilbert de dimensión infinita. Sin embargo, en la representación de posiciones—útil para hacer comparaciones con la mecánica bohmiana—la función de onda tiene la forma $\psi(t)=\psi(q,t)$, con $q\equiv(\overrightarrow{q}_1,\overrightarrow{q}_2,...,\overrightarrow{q}_N)\in\mathbb{R}^{3N}$ y $\overrightarrow{q}_k\equiv(x_k,y_k,z_k)\in\mathbb{R}^3$. Esto es, matemáticamente, la función de onda (en la representación de posición) es un campo definido en un espacio 3*N*-dimensional conocido como el «espacio de configuración» del sistema.

Debe de notarse que diferentes tipos de sistemas físicos se modelan a través de diferentes operadores hamiltonianos, tal y como ocurre en la mecánica hamiltoniana clásica. Por ejemplo, si consideramos un sistema de *N* partículas sujetas a un potencial que depende solo de la posición, $V(\overrightarrow{q}_1,\overrightarrow{q}_2,...,\overrightarrow{q}_N)$, la ES en la representación de posición tiene la forma:

(2) $i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\Psi\left(\overrightarrow{q}_1,\overrightarrow{q}_2,...,\overrightarrow{q}_N,t\right)=\left[-\sum_{k=1}^{N}\frac{\hbar^2}{2m_k}\nabla_k^2+V\left(\overrightarrow{q}_1,\overrightarrow{q}_2,...,\overrightarrow{q}_N,t\right)\right]\Psi\left(\overrightarrow{q}_1,\overrightarrow{q}_2,...,\overrightarrow{q}_N,t\right)$

en donde m_k es la masa de la *k*-ésima partícula y ∇_k^2 es el operador laplaciano para las coordenadas de la *k*-ésima partícula.

Esta ecuación habría sido diferente, por ejemplo, si hubiéramos considerado que el sistema está sujeto a una interacción electromagnética o que las partículas tienen espín. Además, (2) todavía puede especificarse más eligiendo una función potencial específica, como el potencial gravitatorio.

Como es bien sabido, la MCE suele hacer predicciones probabilísticas. Cuando las predicciones se refieren a las posiciones de las partículas constituyentes del sistema, son proporcionadas por la denominada «Regla de Born», que puede formularse de la siguiente manera:

> La densidad de probabilidad de encontrar el sistema en la configuración *q*=*Q* en el tiempo *t* viene dada por

(3) $\text{Prob}_t^{\psi}(q=Q)=|\psi(Q,t)|^2$

Para dar cuenta de la repetibilidad de los resultados de las mediciones—el hecho de que dos mediciones sucesivas e inmediatas de la misma propiedad producirán el mismo resultado—la teoría asume que la evolución sancionada por la ecuación de Schrödinger *no* es universalmente válida y se postula un colapso repentino de la función de onda cuando ocurre una medición. Pero, dado que no se proporciona un análisis del término ‘medición,’ la teoría es vaga y puede tomarse, en el mejor de los casos, como un algoritmo predictivo que funciona a efectos prácticos.

La mecánica bohmiana (en adelante, MB) no adolece de estas dificultades. En esta teoría, el estado de un sistema cerrado de *N* partículas se especifica mediante su función de onda y las posiciones de las partículas constituyentes, que, como ya hemos indicado, están siempre bien definidas. Así, el estado completo viene dado por el par $(\psi(q,t),\,Q(t))$, en donde $Q(t)\equiv\left(\overrightarrow{Q}_1(t),\ldots,\overrightarrow{Q}_N(t)\right)$ y $\overrightarrow{Q}_k(t)\equiv(X_k(t),Y_k(t),Z_k(t))$ es la posición de la *k*-ésima partícula (en el tiempo *t*).

Puesto que el estado de un sistema incluye dos elementos, a saber, la función de onda y la configuración de las partículas, la teoría postula dos leyes fundamentales de evolución temporal. Así, la función de onda evoluciona en el tiempo de acuerdo con la ecuación de Schrödinger. A diferencia de la MCE, en la MB dicha evolución temporal no admite excepción. La segunda ley dicta el movimiento de las partículas. Esta es la llamada «Ecuación de Guía» ("guidance equation," en inglés; en adelante, EG), según la cual la velocidad de las partículas bohmianas está determinada por la función de onda. Para un sistema de *N* partículas sin espín sujetas a un potencial clásico que solo depende de la posición, esta ecuación tiene la siguiente forma:

$$(4)\ \ \vec{v}_k \equiv \frac{d\vec{Q}_k(t)}{dt} = \frac{\hbar}{m_k}\ Im\left(\frac{\vec{\nabla}_k\psi(\vec{q}_1,...,\vec{q}_N,t)}{\psi(\vec{q}_1,...,\vec{q}_N,t)}\right)\Bigg|_{\vec{q}_l=\vec{Q}_l(t)}, \qquad k,l=1,...,\ N\ \text{(EG)}$$

donde $\vec{v}_k$ es la velocidad de la k-ésima partícula, m_k es su masa y $\vec{\nabla}_k$ representa el gradiente con respecto a las variables $\vec{q}_k \equiv (x_k, y_k, z_k)$.[8] De acuerdo con la EG, la velocidad de una partícula (en un instante dado) depende de la función de onda, la cual, a su vez, depende de las posiciones de *todas* las partículas (en ese mismo instante). Por tanto, la EG es la clave del carácter explícitamente no local de la MB.

Tanto la ES como la EG son ecuaciones deterministas. Dada la función de onda en un instante inicial, la ES determina la función de onda en todo momento. Además, dada la posición inicial de las partículas y la función de onda, la EG determina la posición de las partículas en todo momento. Por tanto, si hay lugar para la probabilidad en esta teoría, está claro que esta deberá tener un carácter epistémico y constituir una medida de nuestra ignorancia. Así, el denominado «Postulado Estadístico» (en adelante, PE) sanciona que:

> En un cierto tiempo inicial, t_0, la densidad de probabilidad (epistémica) de la configuración $q{=}Q$ viene dada por:

$$(5)\ \ \text{Prob}^{\psi}_{t_0}(q=Q) = |\psi(Q,t_0)|^2\ \text{(PE)}$$

Debe notarse que el PE equivale a la Regla de Born mecánico-cuántica *para un instante de tiempo inicial,* t_0. Ahora bien, la dinámica sancionada por la ES y la EG es tal que, si en un instante inicial nuestro conocimiento de la posición de las partículas se ajusta a PE, entonces, para cualquier instante posterior, *t*, tendrá que ajustarse a la distribución

$$(6)\ \ \text{Prob}^{\psi}_{t}(q=Q) = |\psi(Q,t)|^2,$$

a menos que ocurra una medición de la posición de las partículas, lo cual obviamente modifica nuestro conocimiento de dicha propiedad. En resumen, aunque en MB las partículas siempre tienen unas posiciones bien definidas, la propia teoría impone un límite a nuestro conocimiento de éstas. Este es el significado del PE que se introduce, obviamente, para asegurar la equivalencia empírica de la teoría con la MCE.

[8] Es conveniente notar la que forma de la EG puede variar dependiendo del hamiltoniano y, por lo tanto, de la ES. Por ejemplo, para potenciales con una dependencia explícita de la velocidad —como un potencial electromagnético—la expresión para la EG es diferente. También es diferente en el caso de partículas con espín.

2.2. La naturaleza de la función de onda

El par $(\psi(q,t),\, Q(t))$ caracteriza por completo el estado físico de un sistema bohmiano. Mientras pocos dudan de que $Q(t) \equiv \left(\overrightarrow{Q}_1(t), \ldots, \overrightarrow{Q}_N(t)\right)$ representa la configuración de de *N* partículas en el espacio físico tridimensional, la interpretación del otro miembro del par—la función de onda—plantea más dificultad. De acuerdo con la EG (4), la velocidad de cada partícula depende de la función de onda, situación que puede resultar reminiscente de cómo, en mecánica clásica, la trayectoria de partículas con masa o con carga depende del campo electromagnético o el gravitatorio. Esta analogía nos llevaría a considerar a la función de onda como representando a un campo físico que, en efecto, "guía" a las partículas bohmianas. Sin embargo, aunque la heurística puede funcionar para sistemas de una sola partícula, hay que pensar que la candidata a reificación es la función de onda *universal* y esta es un campo definido en un espacio 3*N*-dimensional, siendo *N* el número de partículas del universo. Por ende, asumir que la función de onda representa un campo físico implica tomarse en serio el espacio de configuración como un marco real y no considerarlo una mera abstracción para representar configuraciones de partículas en el espacio tridimensional ordinario. Esta posición—conocida como realismo acerca del espacio de configuración—no sería la única dificultad de interpretar la función de onda como un campo físico. Si el campo habita el espacio de configuración, pero las partículas habitan el espacio tridimensional, surge la cuestión de cómo ambas entidades se "comunican."[9] A pesar de estos y de otros problemas,[10] diversos bohmianos abogan por interpretar la función de onda como representando a un campo físico multi-dimensional.[11]

Las dificultades de la interpretación de campo constituyen un acicate para plantear alternativas. La más discutida recientemente es la denominada «interpretación nomológica» de la función de onda, desarrollada principalmente por Detlef Dürr, Sheldon Goldstein y Nino Zanghì (en adelante, DGZ).[12] Dichos autores parten también de la EG y observan que, de acuerdo con esta ecuación, el rol de función de onda es especificar la ley de movimiento de las partículas bohmianas, esto es, determinar el lado derecho de (4). Dicho en otras palabras, si se conoce la forma específica de la función de onda (universal), se conoce qué relación funcional y legal hay entre la velocidad de la *k*-ésima partícula bohmiana y las posiciones de todas ellas. DGZ se apoyan, además, en una analogía formal entre la EG (que puede reescribirse de forma compacta como

$\frac{dQ}{dt} = Der(\log(\Psi))$,

en donde 'Der' es un operador diferencial) y las ecuaciones de Hamilton de la mecánica clásica (que pueden escribirse como

$\frac{d\xi}{dt} = Der^*(H_{\text{class}})$,

en donde ξ representa las variables de estado clásicas, H_{class} es el hamiltoniano clásico y, de nuevo, 'Der*' es un operador diferencial adecuado). Esta comparación vendría a sugerir que el rol de la función de onda en mecánica bohmiana (o de su logaritmo) es análogo al del hamiltoniano en mecánica hamiltoniana clásica. Y debe notarse, en este sentido, que el

[9]Nótese que ninguna de las dimensiones del espacio de configuración se corresponde de modo directo con alguna de las tres dimensiones del espacio físico ordinario.

[10]Para los problemas de la interpretación y la discusión de las alternativas véanse las secciones relevantes de Belot (2012) y Solé y Hoefer (2019), además del ya mencionado Esfeld *et al.* (2014).

[11]Entre ellos puede citarse al propio Bohm (1952), también Valentini (1992), Holland (1993) y Bell (1987).

[12]Véase Dürr et al. (1997) y Goldstein y Zanghì (2013).

hamiltoniano *no* representa el estado (contingente) de un sistema sino más bien las fuerzas (y, por ende, las leyes de interacción) que rigen el movimiento. Este sería también el rol de la función de onda en mecánica bohmiana, de acuerdo con DGZ. De hecho, puede sacársele incluso más partido a esta analogía. H_{class} es una función definida en el espacio fásico $6N$-dimensional, pero esto no supone un problema debido a su carácter nomológico; si la función de onda fuera, también, nomológica, el hecho de que esté definida en un espacio $3N$-dimensional tampoco debería ser visto como problemático.[13]

En este contexto, Esfeld et al. (2014) investigan el fundamento filosófico de la interpretación nomológica de la función de onda y si ésta es compatible, entre otras, con una concepción "humeana" de las leyes de la naturaleza. Esta concepción tiene diversos precedentes, pero el filósofo David Lewis es quien la ha defendido con mayor ahínco en debates recientes. Se basa en la tesis de la superveniencia humeana, que el propio Lewis resume del siguiente modo:

> Es la doctrina de que todo lo que hay es un vasto mosaico de hechos locales y particulares, simplemente una pequeña cosa tras otra [. . .] Existe una geometría: un sistema de relaciones externas de distancia espaciotemporal entre puntos [. . .] Y en esos puntos hay cualidades locales: propiedades intrínsecas perfectamente naturales que no necesitan nada más grande que un punto para ser instanciadas. En resumen: existe una distribución de cualidades. Y esto es todo [. . .] Todo lo demás superviene a esto. (Lewis 1986, pp. ix–x; nuestra traducción)

Esta base tan admirablemente caracterizada por Lewis se suele conocer como el «mosaico humeano». Conviene destacar que el hecho de que un punto del mosaico instancie una cierta propiedad perfectamente natural no tiene implicación alguna en relación con qué propiedades instancien otros puntos. No existen conexiones necesarias y cualquier combinación sería en principio posible. Por otro lado, todo—incluidas las leyes—debe de supervenir a los contenidos del mosaico. En consecuencia, en este marco metafísico, las leyes no constituyen un añadido a lo que hay, limitándose a describirlo. Más concretamente, Lewis las caracteriza como los axiomas del sistema que es capaz de dar cuenta de modo óptimo de los contenidos del mosaico, en el sentido de lograr un equilibrio entre simplicidad expresiva y capacidad informativa.

La cuestión es, pues, si la mecánica bohmiana es compatible con esta metafísica humeana y Esfeld et al. responden afirmativamente. Su idea es que el único contenido del mosaico son las posiciones ocupadas por las partículas bohmianas en la totalidad del espacio-tiempo—esto es, un conjunto de trayectorias continuas. Todo lo demás—incluyendo la función de onda universal e incluso otros parámetros como las masas o las cargas—forma parte de la ideología que figura en la ley. Esta afirmación dista de ser trivial pues, si se pretende cuadrar el humeanismo con la interpretación nomológica de la función de onda, debería mostrarse que la función de onda universal sobreviene sobre las trayectorias bohmianas. Sin embargo, pueden plantearse escenarios sencillos que muestran que, en general, no es así: de acuerdo con la mecánica bohmiana, la totalidad de las trayectorias bohmianas en el espacio-tiempo es compatible con

[13] Desafortunadamente para DGZ, las analogías entre el hamiltoniano clásico y la función de onda terminan aquí y hay rasgos de esta última que parecen no encajar con una interpretación nomológica. Por ejemplo, la función de onda es una solución (contingente) de la ES. Pero resulta extraño que un parámetro de una ley fundamental sea, a su vez, solución de otra ley. Para una discusión de esta y otras dificultades la interpretación nomológica, así como de las soluciones que proponen DGZ, véase, por ejemplo, Belot (2012) o Solé y Hoefer (2019).

más de una función de onda. Sin embargo, el humeano puede replicar que hay que escoger la función de onda más simple.[14]

Aún cabe otra interpretación de la función de onda que redunda en una metafísica más inflacionaria que la del humeanista bohmiano. Nótese que, a través de la EG, la función de onda universal asigna una velocidad a cada una de las partículas en función de cuál sea la configuración de todas ellas. Por tanto, puede considerarse que las partículas bohmianas, además de tener posiciones siempre bien definidas, tienen, colectivamente, una propiedad disposicional irreducible: la disposición de moverse de tal y tal modo (de tener tal y tal velocidad) si su configuración es tal y tal. La función de onda universal representaría esta disposición global del sistema de todas las partículas del universo.[15]

Como hemos indicado en la Introducción, Esfeld *et al.* consideran que el disposicionalismo constituye una mejor opción interpretativa que el humeanismo bohmiano, a pesar de que el segundo es bastante más austero metafísicamente. Ahora estamos en condiciones de entender su argumento. Nótese que, para el humeano, las trayectorias bohmianas constituyen un hecho bruto del mosaico y todo lo demás sobreviene a ellas. Si se asume una suerte de principio de acuerdo con el cual

(P) ‘si X sobreviene a Y, entonces X no puede explicar Y,’

entonces, cabe concluir que las trayectorias bohmianas no pueden recibir explicación alguna en el marco humeano. En particular, no podrían ser explicadas en base a leyes, pues las leyes mismas sobrevienen a las trayectorias. Sin embargo, uno bien querría tener una explicación de por qué dichas trayectorias tienen la forma que tienen: por ejemplo, por qué una partícula se aleja en un momento dado de otra, por qué describe una trayectoria curva (en lugar de recta), etc. De acuerdo con Esfeld et al. el disposicionalista puede responder satisfactoriamente a esta pregunta, pues la disposición global del sistema de todas las partículas bohmianas es una propiedad causal que explica su movimiento. Por tanto, la razón para preferir el disposicionalismo y descartar el humeanismo bohmiano se basa en el mayor poder explicativo del primero.[16]

Es pertinente, pues, analizar si la mecánica bohmiana es una teoría explicativa y si la

[14]Para una discusión de este punto, véase Callender (2015). No es el objetivo de nuestro trabajo entrar en este debate y vamos a asumir, por mor del argumento, que el humeanismo es compatible con la mecánica bohmiana.

[15]Esta interpretación tampoco está exenta de problemas. Por ejemplo, en tanto que disposición atribuida al conjunto de todas las partículas del universo, dicha disposición debe de manifestarse espontáneamente, pues no hay nada externo que pueda actuar de disparador. Para una discusión de este y otros problemas del disposicionalismo, véase Belot (2012). Para una defensa con un planteamiento alternativo, véase Suárez (2015).

[16]El principio (P) no está explícitamente asumido en Esfeld et al. (2014), pero funciona de modo implícito. En primer lugar, respecto del humeanismo, los autores afirman: “There is a common objection from physics, which may be taken to be pertinent in our context: on Humeanism, the laws of fundamental physics do not have any explanatory function. They sum up, at the end of the universe, what has happened in the universe, but they do not answer the question concerning why what has happened did in fact happen, given certain initial conditions” (p. 783). Respecto del disposicionalismo y su contraste con el humeanismo, concluyen: “Let us finally compare dispositionalism with Humeanism. [...] Due to this disposition, there are real connections in nature [...]. Second, because this disposition induces a certain form of motion of the particles, it establishes a real connection (a causal connection having the ontological status of a real connection) between the configuration of the particles in the universe at a given time and that configuration at future times. Basing oneself on this disposition, one can therefore explain the temporal development of the configuration of the particles in the universe, given an initial state” (p. 790).

explicación depende de la interpretación preferida de la misma—en este caso, si la explicación depende de asumir un humeanismo bohmiano o una interpretación disposicionalista de la función de onda. Como nuestra herramienta para el análisis es la teoría ASE de la explicación científica, a continuación, ofrecemos una breve caracterización de esta.

3. La explicación como subsunción ampliativa especializada

La teoría ASE constituye un refinamiento del modelo de cobertura legal de Hempel que evita muchos de los problemas de este, manteniéndose lo más fiel posible a la idea de que explicar consiste básicamente en que el explanandum sea nomológicamente esperable a partir de condiciones antecedentes incluidas en el explanans. Esto se logra sin exigir las condiciones estrictas reclamadas tanto por los causalistas como los unificacionistas. En lo que sigue, describiremos brevemente las principales características de ASE, destacando algunas de sus motivaciones, aunque no intentamos proporcionar una defensa completa, ni a los presentes efectos es necesario revisar en detalle las razones de Díez (2014) en favor de que es la mejor propuesta entre las competidoras. Para nuestros propósitos, es suficiente reconocer que constituye una mejora significativa del modelo original de cobertura legal, compartiendo algunos de los beneficios tanto del causalismo como del unificacionismo, sin heredar la mayoría de sus defectos. Claramente, se erige como un contendiente robusto entre los análisis filosóficos existentes acerca la explicación científica y, por lo tanto, vale la pena explorar sus consecuencias.

Como acabamos de mencionar, ASE conserva la esencia de la esperabilidad nomológica hempeliana, pero esta última se reformula dentro de un marco modelo-teórico recurriendo al concepto de "subsunción nomológica." La idea fundamental es que explicar un fenómeno implica, como mínimo, subsumirlo en un patrón nómico (ampliativo y especializado). En este contexto, tanto el explanandum como el explanans se entienden como tipos específicos de modelos o estructuras. En particular, el explanandum está representado por un *modelo de datos*, $MD=<D_1,...,D_n, f_1,...,f_i>$, donde D_i son dominios de objetos y f_i son relaciones o funciones definidas sobre esos dominios. A su vez, el explanans está representado por un *modelo teórico*, $MT=<D_1,...,D_m, g_1,...,g_j>$, que debe incluir al menos los mismos tipos de objetos y funciones que el modelo de datos (aunque puede introducir otros nuevos, un punto central al que volveremos en breve), y se define por la satisfacción de leyes teóricas específicas de cada teoría. Un punto crucial es que los fenómenos a explicar deben ser determinables o medibles sin presuponer las leyes que definen el modelo teórico.

Considérese, por ejemplo, la explicación clásica de la órbita de la Luna. Aquí, el explanandum es el modelo de datos que captura la trayectoria espacio-temporal detectada de la Luna alrededor de la Tierra, mientras que el explanans es el modelo mecánico que incluye masas y fuerzas que satisfacen la Segunda Ley de Newton y la Ley de la Gravitación. Explicar la trayectoria de la Luna es subsumirla en este marco mecánico, mostrando que la trayectoria cinemática de la Luna es "esperable" a partir del modelo mecánico (esto es, la trayectoria cinemática de la Luna es predicha por el modelo mecánico). La subsunción, en este contexto, significa que el modelo de datos es (o es isomórfico a) una parte del modelo teórico (aquí dejamos de lado los aspectos aproximativos y las idealizaciones por mor de simplicidad). Cabe señalar, además, que la noción modelo-teórica de subsunción es más débil que la noción de hempeliana de inferencia. Así, ASE no exige que las explicaciones deban ser inferencias lógicas *stricto sensu*, dando cabida tanto a explicaciones deterministas como probabilísticas (incluyendo las de baja probabilidad) dependiendo de si las regularidades que definen los modelos del explanans son deterministas o probabilísticas. Por otro lado, el sentido de nomicidad requerido por ASE también es muy débil: el modelo del explanans se define por la satisfacción de ciertas leyes, entendidas simplemente como generalizaciones no accidentales que apoyan contrafácticos, y sin importar cuán ceteris paribus, locales o restringidas a un determinado dominio sean. Por último, como el modelo de datos del explanandum se mide sin usar las leyes que definen el modelo teórico, es decir, independientemente de dichas leyes, se garantiza que la subsunción pretendida no es trivial y puede fallar.

Dado que la noción de subsunción nomológica presupuesta por ASE es más débil que la noción de esperabilidad nómica en el modelo de cobertura legal de Hempel, ASE puede evitar los contraejemplos de necesidad, i.e., explicaciones indeterministas de baja probabilidad, que desafían a este último. Por supuesto, también existen conocidos contraejemplos a la suficiencia de los requisitos de Hempel. Para solucionarlos, la estrategia natural es añadir algo a la esperabilidad nomológica hempeliana, estrategia seguida tanto por ASE como por sus competidoras causalista e unificacionista, aunque las adiciones de ASE son menos problemáticas, más débiles, que las impuestas por el causalismo y el unificacionismo.

La idea general es que, para que una subsunción nomológica sea propiamente explicativa, debe ser además tanto *ampliativa* como *especializada*. Como nuestro ejemplo anterior de la Luna ilustra, el modelo del explanans debe incluir elementos nuevos en relación con el modelo del explanandum. Así, en el caso Tierra-Luna, el explanans incluye no solo las propiedades cinemáticas ya presentes en el explanandum, sino también otras nuevas de tipo dinámico, específicamente las masas y las fuerzas, que se comportan con las propiedades cinemáticas del modo que las leyes mecánicas especifican. Aunque posteriormente abundaremos en este punto, ASE no exige que la ampliación sea *ontológica* (esto es, que el modelo explanans contenga propiedades o entidades nuevas) pues puede tratarse solamente de una ampliación *conceptual*. Esta condición de ampliatividad es el adendum principal que hace ASE al hempelianismo, y el que permite distinguir esperabilidades meramente descriptivas o fenomenológicas de las esperabilidades propiamente explicativas. Si las predicciones de movimientos de Newton son explicativas, no es porque sean causales, o unificadoras, sino porque, a diferencia de las predicciones de Kepler o Galileo, se realizan con leyes que involucran nuevos parámetros dinámicos—esto es, masas y fuerzas—, además de los parámetros cinemáticos.

Sin embargo, aunque la ampliatividad es la nueva condición central, no es suficiente si queremos descartar como explicativas algunas esperabilidades nomológicas que, aunque ampliativas, no son explicativas por su carácter *ad hoc*. La segunda condición que ASE añade a tal efecto es que las leyes utilizadas para definir el modelo del explanans deben ser "especializadas" y no pueden consistir solamente en meros principios programáticos. Esta distinción puede retrotraerse a Kuhn[17] y ha sido elaborada posteriormente por la metateoría estructuralista, que distingue entre principios guía y sus especializaciones en una red teórica (véanse Balzer et al. (1987) y Balzer & Moulines (1998) para varios ejemplos). En este sentido, la mayoría de las teorías son sistemas jerárquicos con leyes de diversos grados de generalidad

[17]Así, Kuhn distingue entre "esquemas de generalización" [generalization schemes], para referirse a los principios programáticos, y "expresiones simbólicas detalladas" [detailed simbolic expressions], para referirse a lo que aquí denominamos especializaciones (Kuhn 1974, p. 465).

dentro del mismo marco conceptual. A menudo, una única ley fundamental o principio guía se sitúa "en la cima" de la jerarquía, mientras que una multiplicidad de leyes especiales se aplica a diferentes fenómenos. Las leyes fundamentales o los principios guía son de naturaleza un tanto programática, ya que se limitan a señalar los tipos de elementos que debemos considerar al intentar explicar un fenómeno particular, estableciendo un marco nomológico esquemático muy general que las leyes específicas deben ir luego detallando. Es crucial señalar que los principios guía generales, cuando se toman de forma aislada sin sus especializaciones, no son empíricamente informativos, ya que son demasiado inespecíficos para ser contrastados aisladamente. Así, para ser contrastadas o aplicadas, las leyes fundamentales o principios guía deben ser especializadas (concretizadas) a través de leyes específicas que articulan las dependencias funcionales que permanecen abiertas en el principio guía más general (Moulines 1984; Díez & Lorenzano 2013). La estructura resultante puede representarse como una red, donde los nodos están dados por los diferentes elementos teóricos y los enlaces representan diversas direcciones de especialización.

Por ejemplo, la red teórica de la mecánica newtoniana tiene claramente a la Segunda Ley de Newton como su principio guía (Balzer & Moulines, 1981; Moulines 1984; Balzer et al., 1987). Esta ley establece el efecto (sobre una partícula de masa *m*) de cualquier fuerza, o combinación de fuerzas, sin especificar qué fuerzas concretas operan en cada situación. Como se representa esquemáticamente en la Figura 1, la especificación de las fuerzas involucra sucesivas especializaciones que establecen, por ejemplo, que puede haber fuerzas dependientes de la distancia, algunas de modo directo (ley de Hooke para péndulos y muelles) y otras de modo inverso (ley de la gravitación universal); fuerzas dependientes de la velocidad, como las de fricción, etc.

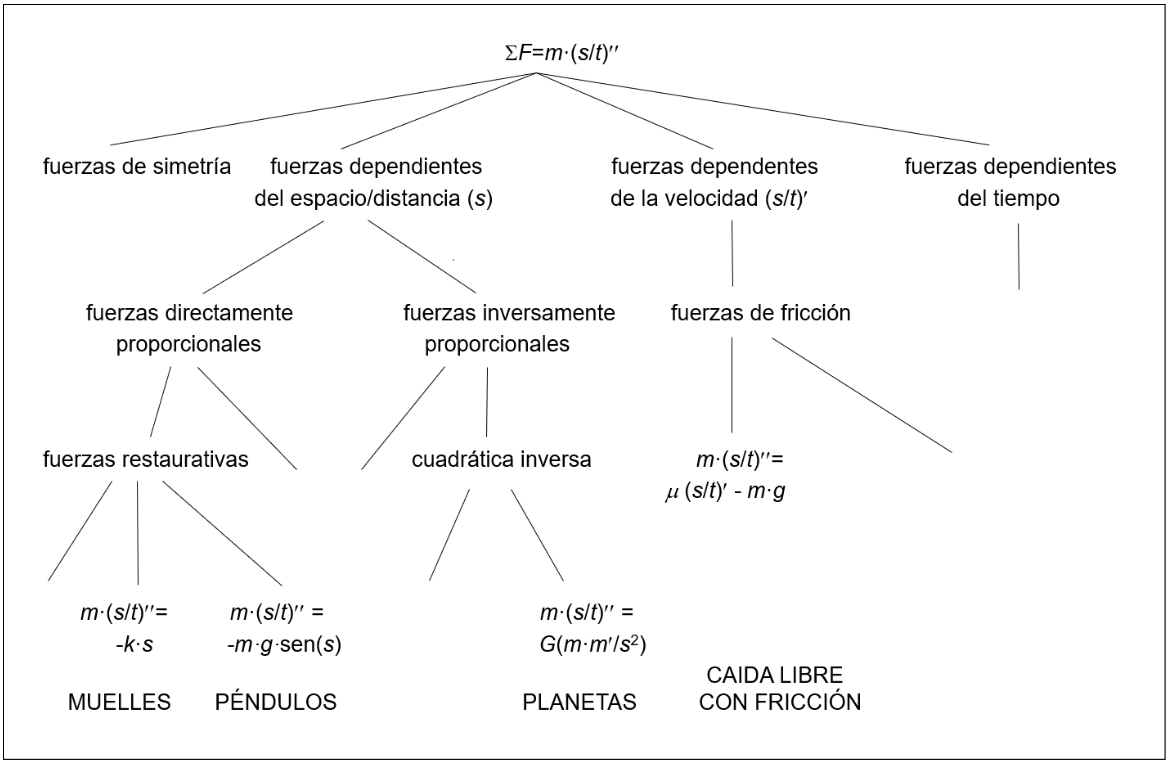

Figura 1. Representación esquemática de la red teórica de la mecánica newtoniana. Nótese que solo se representan algunos nodos.

Es fácil ver cómo otras formulaciones de la mecánica clásica pueden conceptualizarse como redes teóricas en términos análogos. Por ejemplo, en el caso de la mecánica hamiltoniana, las ecuaciones de Hamilton constituyen el principio guía general:

$$(7)\quad \begin{cases} \dfrac{dq}{dt} = \dfrac{\partial H(q,p)}{\partial p} \\ \dfrac{dp}{dt} = -\dfrac{\partial H(q,p)}{\partial q} \end{cases}$$

donde *q* y *p* son las coordenadas y momentos generalizados, respectivamente, y H(*q*, *p*) es la función hamiltoniana. Estas ecuaciones, como tales, son demasiado débiles para tener algún contenido empírico de forma aislada. Para resolver un problema mecánico dentro de este formalismo, es necesario especificar la función hamiltoniana específica que modela el sistema de interés. Como veremos en más detalle, lo mismo puede decirse tanto de la MCE como de la MB, con la ES como un principio guía general que se especializa mediante la elección de un operador hamiltoniano particular.

Sin esta segunda condición de especialización, una subsunción nomológica incluso si es ampliativa puede ser empíricamente trivial y por tanto no explicativa. Tómese por ejemplo la segunda ley de Newton, $\sum_i f_i = m\frac{d^2s}{dt^2}$. Si no hay una restricción adicional sobre el tipo de funciones de fuerza f_i que se pueden utilizar, sin que importe cuán extrañas fueran estas funciones, entonces, como señala Díez (2014), "con solo un poco de habilidad matemática podríamos subsumir cualquier trayectoria" (p. 1425); incluso en el caso de trayectorias sorprendentes, como la de la punta de un bolígrafo movida a voluntad por un hombre, con suficiente habilidad matemática se podría encontrar una serie de funciones de fuerza f_1,f_2,... cuya combinación permitiría derivar dicha trayectoria. Por lo tanto, para que una subsunción ampliativa sea genuinamente explicativa—y no solo un truco *ad hoc*—el modelo debe especificarse utilizando una ley especial en el sentido mencionado.

La distinción entre principios guía generales y leyes especiales puede apreciarse particularmente bien en teorías altamente complejas y unificadas en las que el principio guía se especializa en varias direcciones conformando una red teórica como la que acabamos de caracterizar de modo esquemático para el caso de la mecánica newtoniana. Sin embargo, tal distinción tiene sentido independientemente de que exista una red teórica compleja. La clave radica en que el principio guía no puede contrastarse de modo aislado, mientras que una ley especial sí (por supuesto, como en toda contrastación, se necesitan supuestos auxiliares). Así, por ejemplo, la ley de Hooke, $m\frac{d^2s}{dt^2} = -ks$, tiene la forma de una ley especial con independencia de si aparece integrada en una red teórica con diversas líneas de especialización (de hecho, Hooke planteó dicha ley antes de que Newton formulase el principio guía de la mecánica clásica). En consecuencia, aunque ASE exige que en toda explicación científica haya especialización, este requisito *no* implica que solo puedan darse explicaciones en el seno de teorías unificadas que conforman una red teórica compleja.

Finalmente, nótese que las dos condiciones añadidas a la noción hempeliana central de esperabilidad nomológica —ampliatividad y especialización—, aunque sustantivas y cruciales para abordar los contraejemplos clásicos al modelo original de Hempel, son mucho más débiles que la causalidad o la unificación. Como es bien sabido, ambas condiciones más fuertes no se aplican en algunas explicaciones genuinas. Estas demandas relativamente modestas, cuando se suman a la subsunción nomológica, hacen que la propuesta ASE, aunque sustancial, sea un enfoque "minimista" (que no minimalista, pues ambas condiciones no son meros truismos), manteniendo el marco empirista de Hempel, sin los fuertes compromisos metafísicos que tanto causalistas como unificacionistas deben asumir.

4. Un análisis ASE de la explicación en mecánica bohmiana: el caso del experimento de la doble rendija

Pasemos finalmente a la cuestión del carácter explicativo de la MB y de si éste depende de la interpretación suscrita de la función de onda, usando la teoría ASE como herramienta de análisis metateórico. Hemos indicado en la sección anterior que, cuando se trata de considerar ejemplos potenciales de explicación *científica*, el explanandum debe de ser un fenómeno identificable/medible sin presuponer las leyes de la teoría que es candidata para explicarlo. Hay que considerar, pues, algún fenómeno adecuado como caso de estudio. Aquí vamos a referirnos al experimento de la doble rendija, por tratarse de un experimento harto discutido tanto en la literatura científica como divulgativa y que a menudo se presenta como encerrando la quintaesencia de los misterios cuánticos.[18]

El dispositivo experimental consiste en una fuente, S_1, que emite electrones con un momento relativamente bien definido hacia una barrera, P, con dos rendijas que pueden abrirse o cerrarse. Tras la barrera, se coloca una pantalla, S_2, que detecta el punto en donde impacta cada electrón (véase la Figura 2). La intensidad de la fuente es tan débil que puede asumirse que no hay más de un electrón viajando a través del aparato al mismo tiempo. El experimento se repite un gran número de veces registrándose el patrón de impactos en la pantalla que se obtiene para una determinada disposición de las rendijas. Dicho patrón se modela como una función continua que refleja la probabilidad de impacto por unidad de superficie y que denominaremos como la «distribución empírica.» Cuando solo la rendija superior está abierta, los impactos se agrupan en la región de la pantalla situada justo detrás de dicha rendija. Lo mismo sucede si solo la rendija inferior está abierta. Cuando ambas rendijas están abiertas, uno esperaría que el patrón obtenido fuera la suma de los dos anteriores. Sin embargo, como es bien sabido, esto no es así: experimentalmente se halla un patrón de bandas, con ciertas regiones de la pantalla que reciben muchos impactos, alternadas de otras que apenas reciben ninguno (véase Figura 3).

[18] Nuestra caracterización será muy breve. Para una discusión in extenso del experimento desde una perspectiva bohmiana, véase Holland (1993, pp. 173-189) y las referencias allí indicadas.

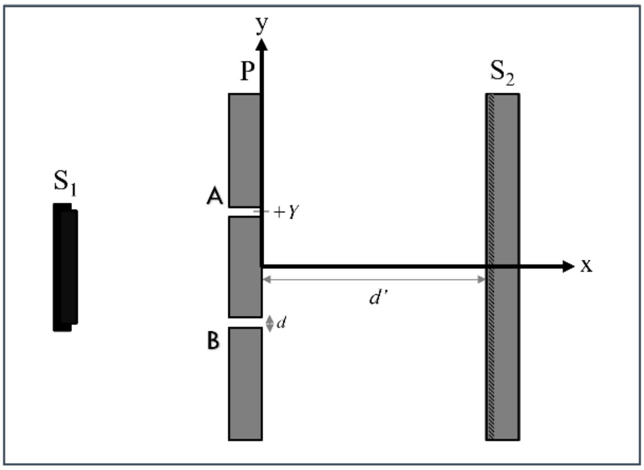

Figura 2. El dispositivo experimental del experimento de la doble rendija.

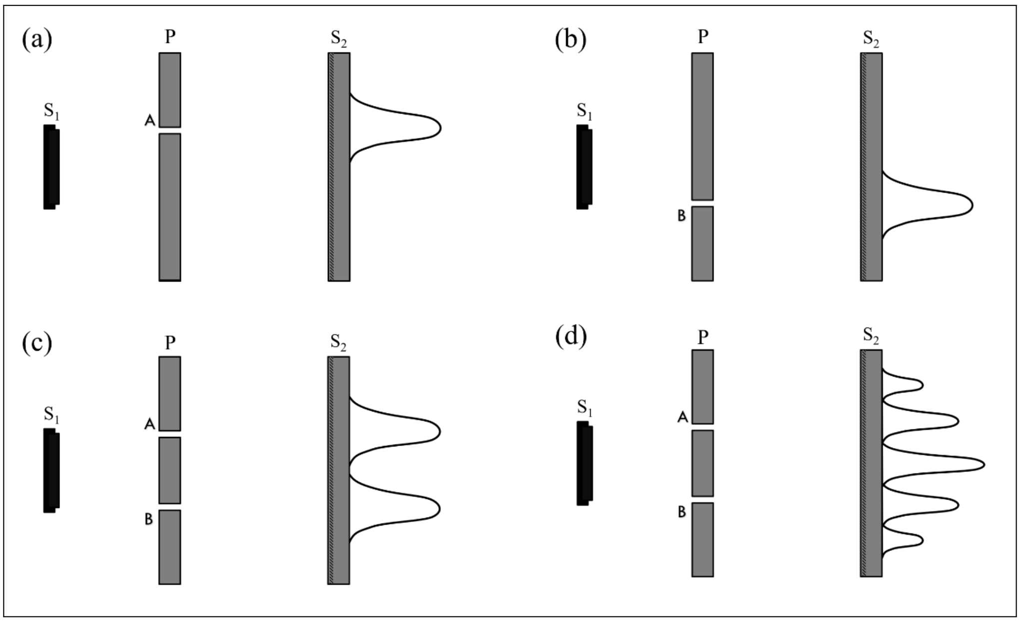

Figura 3. Caracterización esquemática de las distribuciones empíricas obtenidas en el experimento de la doble rendija (que representa la densidad de probabilidad de detección en la pantalla S2). (a) Esquema de la distribución empírica obtenida con la rendija superior, A, abierta. (b) Esquema de la distribución empírica obtenida con la rendija inferior, B, abierta. (c) Distribución empírica esperada clásicamente cuando las dos rendijas están abiertas. (d) Esquema de la distribución empírica obtenida con ambas rendijas abiertas.

El tratamiento bohmiano de este fenómeno es como sigue. Los electrones incidentes suelen modelarse con una función de onda que se corresponde con una onda plana. A su vez, las rendijas se modelan como rendijas gaussianas. Esto es, se asume que el efecto de una rendija es generar (cuando está abierta) una función de onda con un perfil gaussiano en la dirección paralela a la barrera, mientras que la forma de la función de onda incidente en la dirección perpendicular no se modifica. La propagación temporal de la función de onda entre las rendijas y la pantalla—que, en el caso de las dos rendijas abiertas, es una superposición de los dos paquetes de ondas que se acaban de describir—se obtiene resolviendo la ES con el hamiltoniano correspondiente a una partícula libre, pues no hay potenciales clásicos en dicha región.

Una vez calculada la función de onda, la EG permite determinar las trayectorias bohmianas en función de la posición inicial del electrón en el plano de las rendijas. Hay que notar que, cuando ambas rendijas están abiertas, las trayectorias resultantes no son rectilíneas, sino que muestran un comportamiento zigzagueante (véase Figura 4). Finalmente, se apela al postulado estadístico, según el cual no se conoce la posición inicial de cada electrón en el plano de las rendijas y se asume una distribución probabilística que viene dada por el módulo al cuadrado de la función de onda. Dicha distribución de probabilidad inicial, junto con las leyes dinámicas de la teoría (ES y EG) implica una distribución de probabilidad final, definida sobre el plano de la pantalla, que coincide de modo aproximado con la distribución empírica (como se muestra en la Figura 3, cuando ambas rendijas están abiertas, las trayectorias tienden a agruparse en ciertas zonas de la pantalla y a evitar otras).

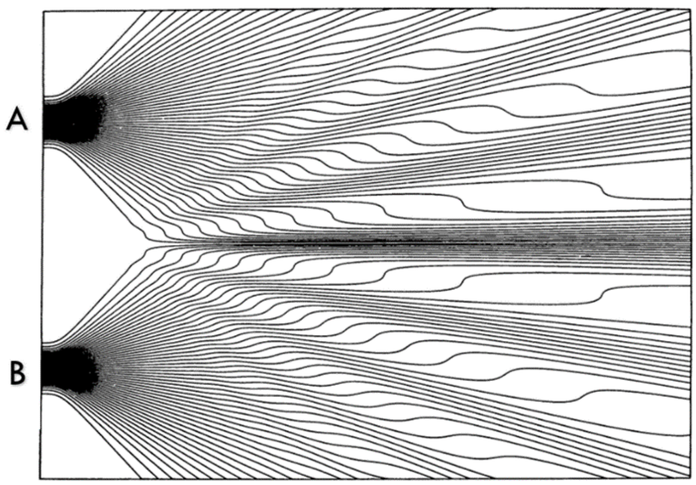

Figura 4. Trayectorias bohmianas para el caso en que ambas rendijas (de tipo gaussiano) están abiertas. La densidad de trayectorias representada en la dirección vertical es proporcional a la densidad de probabilidad (figura extraída de Philippidis et al. (1982)).

¿Cuál sería, pues, el modelo de datos que captura el fenómeno que se pretende explicar? Claramente, este incluye la fuente que emite los electrones preparados de cierta manera, la barrera con las rendijas y la pantalla detectora, junto con las distribuciones empíricas de impactos obtenidas en cada caso. Informalmente, podemos reconstruir dicho modelo de la siguiente manera:

> MD_{DR}(MB)=<conjunto de electrones preparados de cierta manera, barrera con rendijas, pantalla detectora, espacio ($\mathbf{R}^3$), tiempo ($\mathbf{R}$), distribución empírica de impactos>

En cuanto al modelo teórico bohmiano, este incluye los elementos que constituyen el modelo de datos y, crucialmente, otros nuevos como el hamiltoniano (libre), la función de onda, la caracterización de las rendijas como «gaussianas» y las trayectorias bohmianas. Nótese que las trayectorias bohmianas son claramente elementos teóricos (y exclusivamente bohmianos), ya que éstas no se observan ni forman parte del fenómeno a explicar, el cual concierne a la distribución de puntos en la pantalla de detección. Todos los elementos del modelo teórico se definen por la satisfacción de las leyes de la MB, incluyendo la ES, la EG y el postulado estadístico. Así, tenemos:

> MT_{DR}(MB)=<conjunto de electrones preparados de cierta manera, barrera con rendijas, pantalla detectora, espacio ($\mathbf{R}^3$), tiempo ($\mathbf{R}$), distribución empírica de impactos, Hamiltoniano libre, la propiedad aplicada a las rendijas de ser gaussianas, trayectorias> que satisfacen los principios nomológicos ES, EG y el postulado estadístico.

Tras esta caracterización del modelo de datos y el modelo teórico estamos en disposición de discutir si, de acuerdo con ASE, la mecánica bohmiana proporciona explicación científica conceptualmente satisfactoria del experimento de la doble rendija. Como se ha visto en la sección anterior, ASE impone tres condiciones para una explicación científica satisfactoria: ésta debe ser una instancia de una subsunción nomológica ampliativa y especializada. A continuación, abordamos cada una de estas condiciones en orden.

Primeramente, hay que determinar si MD_{DR}(MB) se subsume en MT_{DR}(MB). En términos modelo-teóricos, esto significa que el modelo de datos es una subestructura (o isomórfico a una subestructura) del modelo teórico. Esta condición se satisface en nuestro caso, ya que todos los objetos en el dominio de MD_{DR}(MB) son parte de MT_{DR}(MB). Crucialmente, la distribución teórica de impactos que se deriva de la teoría coincide (o se aproxima) a la distribución empírica, determinada de forma independiente. Por otro lado, MT_{DR}(MB) se define por la satisfacción de ciertas regularidades, como la ES o la EG, con un indudable pedigrí nomológico, por lo que la subsunción es claramente nomológica.

¿Es esta subsunción nomológica ampliativa? Tras la reconstrucción informal anterior, debería quedar claro que la respuesta es afirmativa. El modelo teórico del explanans incluye varios elementos ausentes en el modelo de datos del explanandum, como el Hamiltoniano, la función de onda y las trayectorias bohmianas, que son cruciales para la derivación teórica de los patrones en la pantalla. La condición de ampliatividad se satisface, pues, de forma incontrovertible.

¿Es esta subsunción nomológica ampliativa también especializada? Nótese, a este respecto, que, para calcular la propagación de la función de onda entre las rendijas y la pantalla, el modelo teórico no usa la ES (1) entendida como principio guía, sino una especialización de la misma para el caso de un sistema de una partícula libre, no sometida a ningún campo clásico (N=1 y V=0 en la ecuación (2)). Y esta especialización de ES no es la única ley especial en nuestro caso. La propia suposición de que las rendijas transforman la onda plana incidente en funciones de onda con perfil gaussiano es una forma de especialización "efectiva."

Por tanto, cabe concluir que—de acuerdo con ASE—la MB provee una explicación científica satisfactoria del fenómeno asociado con el experimento de la doble rendija. Cabe señalar que hemos elegido este experimento como caso de estudio por su particular interés, aunque podríamos haber seleccionado otros ejemplos relativos a diferentes fenómenos cuánticos no relativistas, como las mediciones de espín con aparatos de Stern-Gerlach, el efecto túnel, la estabilidad atómica, el oscilador armónico cuántico, etc. Las conclusiones hubieran sido las mismas: en la medida en que la MB es empíricamente adecuada, hay una subsunción del modelo de datos en el modelo teórico en todos los casos; la subsunción es ampliativa, pues en todos los casos el modelo teórico involucra elementos como el hamiltoniano, la función de onda y las trayectorias bohmianas, que no forman parte del modelo de datos; la subsunción es especializada, pues cada caso involucra una especialización de la ES con un hamiltoniano adecuado y, en algunos, también se especializa la EG. Podemos concluir, por tanto, que la MB es una teoría genuinamente explicativa en el sentido de proveer explicaciones científicas de los fenómenos bajo su dominio, de acuerdo con ASE.

5. Discusión

Debe notarse que ninguna de las razones por las que consideramos que la MB proporciona subsunciones nomológicas ampliativas y especializadas depende del debate acerca de la interpretación de la función de onda. Quien defienda que ésta se refiere a un campo físico, incluirá dicho campo en el modelo teórico. Quien defienda que ésta representa propiedades disposicionales de las partículas, incluirá a las partículas (con dichas disposiciones) en el modelo teórico. En ambos casos, se satisface el requisito de ampliatividad. Pero conviene recordar que ASE no requiere que dicha ampliatividad consista en la adición de nuevas entidades físicas, ya que, como mencionamos en la sección 3, es compatible con la mera ampliación conceptual.

En efecto, algunos casos de explicación científica el nuevo material que introduce el explanans respecto del explanandum supone una novedad conceptual, aunque no ontológica. Así sucede típicamente con las explicaciones mediante identidades reductivas empíricas. Por ejemplo, se pueden explicar ciertas regularidades termodinámicas fenomenológicas mediante una explicación reductiva que identifica un gas con un conjunto de moléculas y su transferencia de calor con el cambio en la energía cinética de sus moléculas. En explicaciones reductivas como ésta, se explica un fenómeno postulando en el explanans que dicho fenómeno en realidad idéntico/reducible a otro. Algo análogo sucede en el reduccionismo psicofísico si se defiende que los fenómenos mentales son en realidad fenómenos cerebrales. En este tipo de explicaciones reductivas, el explanans introduce nuevos conceptos, como "energía cinética media de las moléculas", o "zona cortical X activada", hay claramente ampliación conceptual. Pero a diferencia de otros casos, como la introducción de los conceptos "fuerza" y "masa" en mecánica, o "gen/factor" en genética, que denotan entidades diferentes de las involucradas en el fenómeno a explicar (trayectorias y cambios fenotípicos, respectivamente), en los casos reductivos los nuevos conceptos introducidos denotan las mismas entidades que los conceptos que se usaban en el explanandum, p. ej. "temperatura" o "dolor" en los casos mencionados. Literalmente, se trata de las mismas entidades. Cuando hablábamos de "temperatura" ya estábamos hablando (sin saberlo) de la energía cinética media de las moléculas, cuando hablábamos de "dolor" ya estábamos hablando (sin saberlo) de la activación de la zona cortical Z. Tenemos por tanto ampliación conceptual sin ampliación ontológica, nuevos conceptos que son maneras diferentes de conceptualizar las mismas entidades. Estas identidades reductivas empíricas generan un tipo de subsunción nomológica (reductiva) que, aunque diferente de otras explicaciones más comunes, también son explicativas. Y satisfacen también las condiciones de ampliatividad y especialización, aunque la ampliatividad como hemos visto no sea ontológica sino meramente conceptual.

¿Por qué es esto relevante en nuestro caso? Porque una de las interpretaciones en liza, la interpretación humeana de la función de onda, defiende que la lectura humeana de las leyes aplicada a la función de onda, aunque esencial como hemos visto para las explicaciones de los fenómenos cuánticos, no introduce en realidad mobiliario nuevo en el universo, que está constituido, tanto antes como después de la explicación, exclusivamente por el mosaico de trayectorias bohmianas. La explicación recurre a "algo" nuevo, la función de onda, pero según el humeano ese concepto no nombra una entidad nueva en el mundo. Por tanto, también incluso en el caso del humeano, para quien la función de onda supone un mero añadido conceptual pero no ontológico, hay ampliatividad y con ello (y la especialización) explicación empírica.[19]

Llegamos, por tanto, al veredicto ecuménico de que todas las interpretaciones de la MB discutidas proveen una explicación científica satisfactoria de los fenómenos cuánticos no relativistas. Es más, este veredicto ecuménico puede extenderse fácilmente a otras teorías cuánticas (y a sus diferentes interpretaciones). En la medida en que todas estas teorías son empíricamente adecuadas, permiten derivar las distribuciones empíricas; todas ellas usan regularidades no accidentales (por ejemplo, la ES) que se especializan según el fenómeno considerado (mediante la elección de hamiltoniano); y todas ellas lo hacen de modo ampliativo, mediante el recurso al propio hamiltoniano, la función de onda, etc.

Esta situación puede causar una cierta perplejidad. Hemos argumentado, al principio, que muchas de las disputas interpretativas en la filosofía de la mecánica cuántica pretenden resolverse aludiendo a diferencias en el poder explicativo entre teorías e interpretaciones que están infradeterminadas por los datos. Sin embargo, ahora concluimos que, de acuerdo con ASE, todas estas teorías están a la par respecto de la posibilidad de proveer una explicación científica satisfactoria de los fenómenos. ¿Cómo entender, entonces, las supuestas diferencias en el poder explicativo desde la perspectiva de ASE?

Una posibilidad consistiría en considerar que algunas de las condiciones requeridas, como la especialización y la ampliatividad, vienen en grados, y que, en consecuencia, las explicaciones también pueden variar en grado. Así, por ejemplo, a mayor ampliatividad—a mayor cantidad de elementos nuevos en el explanans—mayor poder explicativo. Creemos, sin embargo, que este *no* es el enfoque correcto. No es el caso que cuántos más elementos nuevos en el explanans mejor sea la explicación: como creen los unificacionistas (pero no solo ellos), la simplicidad puede ser un valor. Y algo similar podría decirse respecto de la especialización: mientras el explanans no use solamente principios programáticos sin restricción, una ley más especializada no tiene por qué ser más explicativa.

Consideramos que la respuesta correcta apunta en otra dirección. ASE establece tres condiciones *mínimas* pero suficientes para que exista una explicación científica satisfactoria. Sin embargo, a la hora de comparar esta propuesta con teorías de la explicación rivales, Díez (2014, p. 1415) ha reconocido de modo explícito que el enfoque ASE "es compatible con la presencia de características adicionales (causalidad, mecanismos, manipulabilidad, unificación sustantiva, etc.) en ocasiones concretas en teorías o modelos específicos." Es decir, más allá de la subsunción en base a leyes ampliativas y especializadas, ASE admite la posibilidad de que ciertas características adicionales, como la referencia a la causalidad, o a mecanismos, o como ganancia simplificadora, o como continuidad conceptual con teorías anteriores, u otras, etc., puedan *añadir* valor epistémico *en contextos científicos específicos*. ASE considera estas características como virtudes epistémicas explicativas adicionales, pero no conceptualmente

[19]Conviene advertir que el carácter ampliativo de la subsunción no depende solamente de la función de onda, sino también del hamiltoniano o de las mismas trayectorias bohmianas.

necesarias para la explicatividad, que pueden ser valoradas en ciertos casos y cuya presencia o ausencia permita juzgar a una explicación científica como "mejor" que otra, o comparar el poder explicativo de diferentes teorías. Calificar estas virtudes como virtudes explicativas adicionales, o como virtudes epistémicas no explicativas que dado el caso se añaden a las condiciones explicativas generales, es en parte una cuestión terminológica. Pero la clave radica en que ninguna de estas virtudes puede ser elevada al nivel de una condición universal que constriña toda teoría científica aceptable y, por tanto, su consideración será siempre pragmática y contextual.

Creemos que este tipo de dinámica es la que está precisamente en juego en los debates explicativos en la mecánica bohmiana y en la mecánica cuántica en general. Así, un principio como el anteriormente mencionado (P)—que parece requerir para una buena explicación que haya ampliación de tipo ontológico (y no meramente conceptual)—, puede constituir un desiderátum válido en cierto dominio, pero *no* puede elevarse a un requisito para toda explicación científica. El argumento de Esfeld et al. (2014) también puede verse como una preferencia por un tipo de explicación que involucre elementos de tipo causal (i.e., las disposiciones bohmianas) pero, de nuevo, no es adecuado elevar la causalidad a un requisito para toda explicación científica. De acuerdo con ASE, solo los requisitos de subsunción nomológica ampliativa y especializada son parte esencial de la noción de explicación científica y tienen un carácter universal.

El hecho de que las virtudes adicionales que permiten fundamentar juicios acerca del poder explicativo sean necesariamente contextuales y pragmáticas explicaría por qué alcanzar un consenso sobre estos asuntos es tan desafiante, si no imposible. En cualquier caso, sería un error filosófico suponer que lo que está en juego en estos debates es la mera posibilidad de proporcionar una explicación científica de los fenómenos empíricos. Estas consideraciones podrían hacer pensar que las disputas acerca del poder explicativo en mecánica cuántica pierden importancia e interés. No creemos que este sea el caso. Si bien necesariamente locales y pragmáticos, ciertos juicios sobre las virtudes explicativas pueden resultar ampliamente compartidos dentro de una comunidad y considerarse importantes. Si no fuera así, sería difícil entender la pasión con la que físicos—y no solo filósofos—se han involucrado en el debate sobre las diferentes teorías e interpretaciones cuánticas. Desde un punto de vista metodológico, el mejor modo de proceder en esta situación es hacer explícito, tan claramente como sea posible, lo que se valora como explicativo desde un punto de vista puramente conceptual y analizar si las diversas interpretaciones o teorías cuánticas satisfacen estas demandas.

Queremos concluir con un último apunte que incide, de nuevo, en la rivalidad explicativa entre disposicionalistas y humeanos bohmianos tal y como la caracterizan Esfeld et al. (2014). El argumento en favor del disposicionalismo puede eventualmente entenderse de dos modos: o bien se afirma que (i) el disposicionalismo provee una mejor explicación *de los fenómenos*, o bien se afirma que (ii) el disposicionalismo provee una mejor explicación *de las mismas trayectorias bohmianas*. En el caso de (i) se aplicarían las consideraciones que acabamos de hacer: estaríamos ante un juicio de valor basada en una preferencia por una explicación con ingredientes causales que no puede universalizarse. En el caso de (ii) estaríamos ante una situación singular que desborda, a nuestro juicio, el dominio de la explicación *científica*.

Nótese que, en el caso (ii), el explanandum ya no es una densidad de probabilidad empírica (como la densidad de probabilidad de impactos en la pantalla en el caso del experimento de la doble rendija), sino las trayectorias bohmianas, que formaban parte del explanans del explanandum original. Sin embargo, tratar estas trayectorias como un explanandum científico y empírico es problemático. Como hemos indicado, para que una explicación sea falible, el explanandum debe poder medirse y determinarse independientemente de las leyes utilizadas en el explanans. Pero las trayectorias bohmianas *no* son medibles en ningún sentido ordinario del término sin presuponer las propias leyes de la MB. Por tanto, si lo que se pretende es (ii), se está pretendiendo usar ciertos elementos teóricos de la mecánica bohmiana para dar cuenta de otros, pero no se pretende estar dando cuenta de un fenómeno detectable de modo independiente. En tal caso, el explanandum bien podría ser tomado como primitivo (como podría hacerlo el humeano) y el tipo de explicación proporcionada sería más metafísica que empírica.

Financiamiento

Los autores agradecen la financiación del Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España y de la Agencia Estatal de Investigación a través de los proyectos PID2020-115114GB-I00, PID2024-158050NB-I00 y CEX2021-001169-M.

Referencias

Balzer, W., & Moulines, C. U. (1981). Die Grundstruktur der klassischen Partikelmechanik und ihre Spezialfsierungen. *Zeitschrift für Naturforschung* A, 36(6), 600-608.

________(1998). *Structuralist theory of science: Paradigmatic reconstructions*. Amsterdam: Rodopi.

Balzer, W., Moulines, C. U., & Sneed, J. D. (1987). *An architectonic for science: The structuralist program* (Vol. 186). Springer Science & Business Media.

Bell, J.S. (1987). *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press.

Belot, Gordon (2012). Quantum states for primitive ontologists. A case study. *European Journal for Philosophy of Science,* 2, 67-83.

Bohm, D. (1952). A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of 'Hidden' Variables I and II. *Physical Review* 85, 166–193.

Bohm, D., & Hiley, B.J. (1993). *The Undivided Universe: An Ontological Interpretation of Quantum Theory*. London: Routledge & Kegan Paul.

Brown, H. R. & Wallace, D. (2005). Solving the Measurement Problem: de Broglie-Bohm Loses Out to Everett. *Foundations of Physics*, 35, 517–540.

Callender, C. (2015). One world, one beable. *Synthese* 192, 3153-3177.

Díez, J. A. (2014). Scientific explanation as ampliative, specialized embedding: a neo-Hempelian account. *Erkenntnis*, 79, 413–1443.

Díez, J. A. & Lorenzano, P. (2013). Who Got What Wrong? Fodor and Piattelli on Darwin: Guiding-principles and Explanatory Models in Natural Selection, *Erkenntnis* 78/5, pp. 1143–1175.

Dürr, D., Goldstein, S., & Zanghi, N. (1997). Bohmian mechanics and the meaning of the wave function. En R. S. Cohen, M. Horne, & J. Stachel (Eds.), *Experimental metaphysics: Quantum mechanical studies for Abner Shimony* (pp. 25–38). Springer.

Esfeld, M. (2020). Super-Humeanism: The Canberra Plan for Physics. En Glick, D., Darby, G., & Marmodoro, A., (Eds), *The Foundation of Reality: Fundamentality, Space, and Time,* (pp. 125-138). Oxford University Press.

Esfeld, M., & Deckert, D. (2018). *A minimalist ontology of the natural world*. New York: Routledge.

Esfeld, M., Lazarovici, D., Hubert, M., & Dürr, D. (2014). The ontology of Bohmian mechanics. *British Journal for the Philosophy of Science*, 65, 773–796.

Goldstein, S., & Zanghi, N. (2013). Reality and the role of the wave function in quantum theory. En Ney, A. & Albert, D. (Eds.), *The wavefunction: Essays on the metaphysics of quantum mechanics* (pp. 91–109). Oxford University Press.

Heisenberg, W. 1955. The development of the interpretation of the quantum theory. En Pauli, W. (Ed.), *Niels Bohr and the Development of Physics: Essays Dedicated to Niels Bohr on the Occasion of his Seventieth Birthday* (pp. 12–29). McGraw-Hill.

Holland, P.R. (1993). *The Quantum Theory of Motion: An Account of the De Broglie-Bohm Causal Interpretation of Quantum Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press.

Kuhn, T. S. (1974). Second Thoughts on Paradigms. En F. Suppe (Ed.), *The Structure of Scientific Theories* (pp. 459–482). University of Illinois Press.

Lazarovici, D. (2018). Super-Humeanism: A starving ontology. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 64, 79-86.

Lewis, D. (1996). *Philosophical Papers, Volume 2*. Oxford University Press.

Lewis, P. (2007). How Bohm's Theory Solves the Measurement Problem. *Philosophy of Science*, 74(5), pp. 749–760.

Moulines, C. U. (1984). Existential quantifiers and guiding-principles in physical theories. En J. Gracia, E. Rabossi, E. Villanueva, & M. Dascal (Eds.), *Philosophical analysis in Latin America* (pp. 173–198). Dordrecht: Reidel.

Oriols, X., & Mompart, J. (2019). *Applied Bohmian Mechanics: From Nanoscale Systems to Cosmology*. Jenny Stanford Publishing.

Philippidis, C., Bohm, D. & Kaye, R. D. (1982). The Aharonov-Bohm effect and the quantum potential. *Nuovo Cimento*, 7IB, 75–88.

Solé, A. & Hoefer, C. (2019). The nomological interpretation of the wave function. En Cordero, A., (Ed.), *Philosophers Look at Quantum Mechanics* (Synthese Library Series), Volume 406 (pp. 119–138). Springer Nature.

Suárez, M. (2015). Bohmian dispositions. *Synthese*, 192, 3203–3228.

Valentini, A., (1992). *On the Pilot-Wave Theory of Classical, Quantum and Subquantum Physics* Ph.D. Dissertation, ISAS – International School for Advanced Studies, Trieste.