scientiæ studia, São Paulo, v. 10, n. 1, p. 105-36, 2012

Muchos mundos bohmianos

Albert Solé

RESUMEN

En la literatura, es habitual encontrar caracterizaciones de la mecánica bohmiana como *una* interpretación más de la mecánica cuántica. Esta perspectiva resulta simplificadora en exceso. En este artículo, defiendo un enfoque alternativo de acuerdo con el cual la mecánica bohmiana es una teoría que puede ser interpretada de modos muy diversos. Tras caracterizar la divisoria interpretativa entre los enfoques de guía y del potencial cuántico de la mecánica bohmiana, muestro cómo diferentes interpretaciones de la teoría se corresponden con ontologías o mundos bohmianos radicalmente diferentes e incompatibles. Más concretamente, discuto la posibilidad de interpretaciones de la teoría compatibles con una ontología puramente tridimensional, y exploro las principales posibilidades interpretativas en relación con las propiedades que cabe atribuir a los corpúsculos bohmianos. Finalmente, a través de la comparación entre los mundos bohmianos elucidados, muestro que la elección de interpretación en mecánica bohmiana es tan relevante filosóficamente como lo es en mecánica cuántica.

Palabras-clave • Mecánica bohmiana. Interpretación. Ontología. Realismo. Tridimensionalismo. Enfoque del potencial cuántico. Enfoque de guía. Propiedades bohmianas.

Introducción

En el campo de los fundamentos de la mecánica cuántica, la interpretación es fundamental. Casi ninguna cuestión filosóficamente relevante puede responderse si no se especifica qué interpretación de la teoría se tiene en mente y, lejos de guardar un aire de familia, las respuestas obtenidas pueden diferir radicalmente de interpretación en interpretación.

En la literatura, la mecánica bohmiana suele caracterizarse como *una* más de las interpretaciones de la teoría cuántica y, en consecuencia, suele presentarse como si ofreciese una respuesta única e inequívoca a cuestiones de interpretación fundamentales como, por ejemplo, la pregunta acerca de lo que hay. Así, el tópico consiste en decir que, de acuerdo con la mecánica bohmiana, existe un conjunto de partículas que describen trayectorias bien definidas y cuyo movimiento viene determinado por un campo que en la teoría es representado por la función de onda.

Ese modo de concebir la mecánica bohmiana resulta excesivamente simplificador. En lugar de considerarla como una interpretación más de la teoría cuántica, la mecánica bohmiana se comprende mejor si se la considera como una teoría en sí misma que, a su vez, puede recibir muy diversas interpretaciones. El objetivo de este artículo es presentar la mecánica bohmiana desde esta perspectiva y mostrar que la elección de interpretación en mecánica bohmiana es tan relevante como lo es en mecánica cuántica. Quizás ha sido Fine quien con más vehemencia ha defendido esta postura.

> Cualesquiera que sean las corrientes sociológicas, claramente hemos llegado a un punto en el que puede considerarse la mecánica bohmiana en sí misma, distinguiéndola de las ideas originales de Bohm, del mismo modo en que distinguimos la mecánica de Newton de la mecánica newtoniana. (...) En este ensayo quiero desarrollar el tema de que las teorías no seleccionan una única interpretación, tomándome en serio la mecánica bohmiana y examinando parte de la latitud interpretativa a la que la teoría da lugar (Fine, 1996, p. 232-3).

En su artículo, Fine explora las posibilidades interpretativas de la mecánica bohmiana en relación con el dualismo, el determinismo y el realismo. Sin embargo, el autor deja prácticamente inexplorada la divisoria interpretativa que más polémica ha suscitado en la literatura. Esta disputa concierne la ecuación del movimiento de las partículas bohmianas y los conceptos mecánicos que son considerados fundamentales. Según los partidarios del "*enfoque del potencial cuántico*" (*quantum potential approach*), las partículas bohmianas se mueven de acuerdo con la segunda ley de Newton, modificada con la adición de una nueva fuerza que deriva de un potencial dependiente de la función de onda. Por el contrario, los partidarios del "*enfoque de guía*" (*guidance approach*) consideran que los conceptos mecánicos de segundo orden, como "fuerza" y "potencial", no son fundamentales en mecánica bohmiana, y que el movimiento de las partículas bohmianas viene dado por una ecuación que suministra directamente la velocidad de las mismas como el gradiente de la fase de la función de onda.

En este artículo, tomaré como base la disputa interpretativa entre los partidarios de los enfoques del potencial cuántico y de guía de la teoría, y complementaré la discusión de Fine explorando interpretaciones de la mecánica bohmiana ignoradas por este autor. Me centraré en dos cuestiones fundamentales, a saber, qué entidades cabe postular y cuáles son las propiedades de las partículas bohmianas.

En relación con la primera cuestión, analizaré si la mecánica bohmiana es compatible con una ontología puramente *tridimensional*, esto es, una ontología de acuerdo con la cual sólo existen entidades en el espacio físico tridimensional. Debe notarse que, al contrario de lo que sucede con los campos clásicos, la función de onda *no* es una función de las tres coordenadas espaciales y del tiempo. Para un sistema de N partículas, se necesitan generalmente $3N$ parámetros y el tiempo para definirlo. Puesto que el tópico consiste en decir que, en mecánica bohmiana, la función de onda representa un campo físico real, es lugar común considerar que la teoría está inevitablemente comprometida con una ontología $3N$-dimensional. En contra de ese lugar común, mostraré que hay interpretaciones de la mecánica bohmiana compatibles con una ontología tridimensional y exploraré algunas de ellas. En contra de lo argumentado por Belousek (2003), defenderé que la búsqueda de una interpretación tridimensionalista de la mecánica bohmiana, que sea satisfactoria desde el punto de vista de su poder explicativo, no privilegia el enfoque del potencial cuántico.

La segunda de las cuestiones interpretativas que exploraré concierne a las propiedades de las partículas bohmianas. Si bien la existencia de dichas partículas no ha sido puesta en duda por ningún intérprete de la teoría, sí se ha producido una disputa acerca de cuáles son sus propiedades. Muchos autores mantienen que las partículas bohmianas poseen todas las propiedades de las partículas clásicas y algunas propiedades adicionales genuinamente cuánticas, como el *spin*. Sin embargo, dado el singular rol que desempeña la posición en la teoría, otros intérpretes han argumentado que a las partículas bohmianas sólo cabe atribuirles posición. Analizaré las motivaciones para cada una de esas interpretaciones y discutiré sus implicaciones filosóficas más notorias, más particularmente, en relación con la naturaleza de los procesos de medición.

Más allá del interés intrínseco que puedan tener esos dos casos de estudio y las conclusiones particulares alcanzadas, el propósito general de la discusión será elucidar un conjunto representativo de las interpretaciones de la teoría y mostrar cómo cada una de ellas se corresponde con una ontología o un *mundo bohmiano* diferente. Contrastando los muchos mundos bohmianos que se corresponden con las muchas interpretaciones de la teoría y poniendo de manifiesto su dispar modo de responder a cuestiones filosóficas fundamentales, habré mostrado que, en mecánica bohmiana, la elección de interpretación es tan relevante como lo es en mecánica cuántica.

La discusión se articulará del siguiente modo. En la sección 1, presentaré brevemente los fundamentos de la mecánica bohmiana, de acuerdo con un conjunto de postulados que hoy en día se ha convertido en estándar. Pondré particular énfasis en la teoría bohmiana de la medida, fundamental para comprender la equivalencia empírica con el enfoque mecánico-cuántico estándar, y de gran relevancia en la posterior discusión sobre la atribución de propiedades. En la sección 2, caracterizaré los enfoques del potencial cuántico y de guía de la mecánica bohmiana, discutiendo tanto su conexión como sus principales diferencias, y analizaré los recursos explicativo-causales que cada uno de dichos enfoques permite implementar. En la sección 3, abordaré la cuestión de la adecuación de diferentes interpretaciones de la mecánica bohmiana compatibles con una ontología tridimensional. En la sección 4, me ocuparé del análisis de diferentes interpretaciones de la teoría en relación con las propiedades que cabe atribuir a las partículas bohmianas, y discutiré sucintamente las consecuencias de dichas interpretaciones respecto de la concepción de los procesos de medición. Finalmente, en la sección 5, recapitularé a modo de conclusión algunas de las interpretaciones o mundos bohmianos elucidados anteriormente, con el objetivo de mostrar su radical contraste, poniendo así de manifiesto cuán fundamental es la elección de interpretación en mecánica bohmiana.

1 La mecánica bohmiana en breve

Todas las interpretaciones de la mecánica bohmiana tienen un denominador común que incluye, fundamentalmente, la caracterización precisa del movimiento de las partículas bohmianas y las herramientas que permiten derivar un conjunto de predicciones estadísticas coincidentes con las del enfoque mecánico-cuántico estándar. Este denominador común puede articularse en virtud de un conjunto de postulados, que configuran lo que aquí denominaré la "*versión mínima*" de la mecánica bohmiana, y constituyen el conjunto mínimo de postulados para una teoría consistente y empíricamente equivalente con la mecánica cuántica.

El primero de dichos postulados concierne la descripción del estado físico de un sistema. De acuerdo con la mecánica bohmiana, la caracterización completa del estado físico de un sistema cerrado de N partículas se obtiene especificando (i) la posición de cada una de las partículas que componen el sistema, y (ii) una función matemática que denominaremos función de onda o campo cuántico. El conjunto de las posiciones de cada una de las partículas $Q \equiv (Q_1,...,Q_N)$, $Q_k \in \mathrm{R}^3$, define el punto representativo del sistema en un espacio $3N$ dimensional que se denomina el *espacio de configuración*.[1] La función de onda es también una función definida en el espacio de configuración, esto es, puede escribirse como $\Psi(q,t)$, donde $q \equiv (q_1,...,q_N) \in \mathrm{R}^{3N}$.

La teoría provee, naturalmente, una prescripción para la evolución dinámica de cada uno de los dos elementos que caracterizan a un sistema físico. Así, el segundo postulado de la mecánica bohmiana establece que la evolución temporal de función de onda universal viene dictada por la ecuación de Schrödinger:

$$i\hbar \frac{\partial \Psi(q,t)}{\partial t} = \mathrm{H}\Psi(q,t)\,, \qquad (1.1)$$

donde H es el operador hamiltoniano del sistema en la representación de posición,

$$\mathrm{H} = -\sum_{k=1}^{N} \frac{\hbar^2}{2\mathrm{m}_k}\nabla_k^2 + \mathrm{V}(q)\,; \qquad (1.2)$$

1 En adelante utilizaré letras minúsculas para representar variables y las correspondientes letras mayúsculas para representar los valores concretos de dichas variables.

m_k es la masa de la k-ésima partícula, V(q) el potencial clásico del sistema y ∇_k^2 el operador laplaciano respecto del triplo de de variables q_k. Nótese que, a diferencia del enfoque mecánico-cuántico estándar, en mecánica bohmiana, la evolución lineal suministrada por la ecuación de Schrödinger no admite excepción.

La velocidad de la k-ésima partícula viene dada por la siguiente expresión que suele denominarse *ecuación guía* y constituye el tercer postulado de la versión mínima de la mecánica bohmiana:[2]

$$\frac{dQ_k}{dt} = \frac{\hbar}{\mathrm{m}_k} \mathrm{Im}\left(\frac{\vec{\nabla}_k \Psi\left(q,t\right)}{\Psi(q,t)} \right)\Bigg|_{q=Q}, \qquad (1.3)$$

donde $\vec{\nabla}_k$ es el gradiente respecto del triplo de variables q_k. Haciendo uso de la descomposición de la función de onda en forma polar,

$$\Psi(q,t) = \mathrm{R}(q,t)\exp\left(i\mathrm{S}(q,t)/\hbar\right), \qquad (1.4)$$

donde R y S son dos funciones reales del espacio de configuración, la velocidad de la k-ésima partícula puede escribirse sencillamente como el gradiente de la fase de la función de onda dividido por la masa de la partícula:

$$\vec{\mathrm{v}}_k = \frac{1}{\mathrm{m}_k} \vec{\nabla}_k \mathrm{S}(q,t). \qquad (1.5)$$

De acuerdo con la ecuación guía, la velocidad de una partícula en un instante depende generalmente de la posición que ocupan el resto de partículas del sistema en ese mismo instante, lo cual pone de manifiesto el carácter explícitamente no local de la teoría. Ahora bien, hay situaciones en las que la evolución dinámica de las partículas de un determinado subsistema depende sólo de la configuración de las partículas de dicho subsistema y no de las del resto del universo. Así, por ejemplo, supóngase que la función de onda tiene la forma:

$$\Psi(q_1,...,q_N) = \psi(q_1,...,q_M)\varphi(q_{M+1},...,q_N) + \phi(q_1,...,q_M)\varphi^{\perp}(q_{M+1},...,q_N), \qquad (1.6)$$

donde φ y φ^{1} son funciones con soportes macroscópicamente disjuntos[3] y en que, en el instante t, la configuración $(Q_{M+1}(t),\ldots, Q_N(t))$ se encuentra bajo el soporte de φ. Entonces se obtiene que:

2 Esta es la versión simplificada de la ecuación guía para un sistema de partículas sin *spin*.

3 El soporte de una función f(x) es el conjunto de valores del dominio de la misma cuyas imágenes no son cero.

$$\Psi(q_1,...,q_M,Q(t)_{M+1},...,Q(t)_N)=\psi(q_1,...,q_M)\varphi(Q(t)_{M+1},...,Q(t)_N), \quad (1.7)$$

y una sustitución en la ecuación guía permite comprobar que la evolución dinámica del subsistema compuesto por las partículas 1…*M* depende *exclusivamente* de la función ψ. En tal caso, se dice que el subsistema formado por las partículas 1…*M* tiene una función de onda *efectiva* bien definida e igual a ψ.[4]

La mecánica bohmiana es una teoría completamente determinista en el sentido de que, dada la especificación completa de un sistema físico en un instante arbitrario t_0, la ecuación de Schrödinger y la ecuación guía son compatibles con un sólo estado del sistema para cualquier otro instante de tiempo $t \neq t_0$. Dada la naturaleza determinista de la teoría, resulta obvio que si se introducen probabilidades en la misma, éstas deberán tener un carácter meramente epistémico y representar de algún modo nuestra ignorancia. Así, el cuarto postulado de la versión mínima de la mecánica bohmiana establece que si, en un instante de tiempo t_0, sólo conocemos de un sistema su función de onda ρ_{t_0}, la densidad de probabilidad *epistémica* de la configuración de las partículas viene dada por el módulo al cuadrado de dicha función, esto es:

$$\rho_{t_0}=\left|\Psi_{t_0}\right|^2. \quad (1.8)$$

Este postulado es conocido como el "postulado estadístico" o la "hipótesis del equilibrio cuántico". Es de capital importancia notar que la evolución temporal suministrada por la ecuación de Schrödinger y por la ecuación guía es tal que, si en el instante t_0 la densidad de probabilidad epistémica de la configuración de las partículas viene dada por $\left|\Psi_{t_0}\right|^2$, entonces dicha densidad se corresponderá con $\left|\Psi_t\right|^2$ hasta que no se realice una observación (cf. Dürr *et al.*, 1992, sección 3).

El postulado estadístico se introduce a fin y efecto de asegurar la equivalencia empírica entre la mecánica bohmiana y el enfoque mecánico-cuántico estándar. Dicha equivalencia puede demostrarse sólo mediante el concurso de la *teoría bohmiana de la medida*, la cual es fundamental, además, para comprender otros muchos aspectos de la teoría, como el singular rol que desempeña la posición en mecánica bohmiana. Dada la importancia de la teoría bohmiana de la medida, terminaré esta sección con una breve discusión de la misma.[5]

4 Nótese que, desde una perspectiva bohmiana, no es la función de onda, sino la función de onda *efectiva*, el elemento que se corresponde con la práctica habitual de atribuir funciones de onda a subsistemas en el laboratorio. Para una caracterización precisa de la noción de función de onda efectiva de un subsistema, cf. Dürr *et al.* (1992, p. 863).

5 Bohm dedica la casi totalidad del segundo de los artículos seminales de la mecánica bohmiana a la teoría de la medida (cf. Bohm, 1952b, sección §2 ss.). Para otros dos detallados análisis de la teoría de la medida desde una perspectiva bohmiana, cf. Bohm & Hiley (1993, cap. 6) y Holland (1993, cap.8).

El análisis de la medición, desde una perspectiva bohmiana, comprende la discusión de la evolución tanto de la función de onda como de la configuración de las partículas de los subsistemas involucrados. Consideraré la medición de una propiedad P de un sistema de una partícula, cuya configuración representaremos mediante la variable x. Por simplicidad, asumiré que el operador autoadjunto que representa la propiedad P tiene un espectro discreto, siendo ψ_i el i-ésimo estado propio del operador con valor propio p_i. Del aparato de medida, tendré en cuenta sólo una de las partículas de su puntero, cuya posición representaré mediante la variable y. Consideraré, finalmente, que la interacción con el entorno es despreciable y que, por tanto, el sistema formado por el objeto y el aparato constituye un sistema cerrado. Inicialmente, la función de onda de dicho sistema es:

$$\Psi(x,y)=\psi(x)\phi_R(y)=\left(\sum_i c_i\psi_i(x)\right)\phi_R(y), \qquad (1.9)$$

donde ϕ_R es la función de onda (efectiva) del aparato cuando está preparado para la medición y ψ es la función de onda (efectiva) inicial del objeto. La segunda igualdad en (**1.9**) refleja el conocido lema matemático de acuerdo con el cual una función de onda arbitraria puede escribirse siempre como una combinación lineal del conjunto de estados propios de un operador autoadjunto. Asumiré, además, que el proceso de medición es ideal, de modo que la interacción entre sistema y aparato es tal que se induce la siguiente evolución temporal:

$$\psi_i(x)\phi_R(y)\mapsto\psi_i(x)\phi_i(y), \qquad (1.10)$$

donde ϕ_i representa al puntero del aparato apuntando alrededor de la dirección Y_i, lo cual se toma como indicación de que el resultado de la medición es que el objeto tiene la propiedad P con valor p_i. La asunción fundamental es que las direcciones Y_i e Y_j son macroscópicamente distinguibles (para cualesquiera i y j tales que $i\neq j$), de modo que los soportes de las funciones pueden considerarse disjuntos.

La evolución (**1.10**) junto con la linealidad de la ecuación de Schrödinger implica que la función de onda inicial (**1.9**) se convierte en la siguiente superposición al término de la medición:

$$\Psi(x,y)=\sum_i c_i\psi_i(x)\phi_i(y). \qquad (1.11)$$

Hasta este punto, las teorías cuántica y bohmiana de la medida coinciden. El célebre "problema de la medida" no es otro que tratar de reconciliar el hecho de que toda medición arroja un resultado determinado con el hecho de que, tras la medición, la función de onda del sistema compuesto por el objeto y el aparato tiene la forma de la superposición (**1.11**). Como es bien sabido, el enfoque mecánico-cuántico estándar resuelve el problema invocando la hipótesis del *colapso* o *reducción* de la función de onda, de acuerdo con la cual el campo cuántico sufre una transición discontinua y estocástica, convirtiéndose en uno sólo de los términos de la superposición (**1.11**). En mecánica bohmiana *no* se necesita invocar el colapso de la función de onda para garantizar que toda medición tiene un resultado bien definido. La manera de resolver el problema de la medida, en mecánica bohmiana, es tan sencilla que casi parece trivial. De acuerdo con la teoría, toda medición tiene siempre un resultado bien definido porque el puntero del aparato siempre tiene una posición bien definida que indica, precisamente, el resultado de la medición.

Nótese que, de acuerdo con el postulado estadístico, no conocemos con precisión las posiciones iniciales de las partículas del sistema, de modo que tampoco podemos conocer con certidumbre su evolución futura. Sin embargo, dada la función (**1.11**), dicho postulado implica que la probabilidad (epistémica) de que, al término de la medición, el puntero del aparato se halle alrededor de la posición Y_k es igual a $\left|c_k\right|^2$. Así, la mecánica bohmiana predice que hay una probabilidad igual a de que el resultado de la medición sea que el objeto tiene la propiedad P con valor p_k. Estas predicciones son obviamente equivalentes a las del enfoque mecánico-cuántico estándar. Por otro lado, si al término de la medición el puntero del aparato se encuentra alrededor de la posición Y_k, entonces el paquete $c_k\psi_k\phi_k$ se ha convertido en el único componente de (**1.11**) relevante para la evolución futura del sistema y $\psi_k(x)$ es la función de onda efectiva del subsistema objeto de la medida. Así, aunque en mecánica bohmiana no se produce nunca un colapso de la función de onda tras una medición, sí se produce un colapso *efectivo* y, en consecuencia, si se observa que el resultado de la medición es p_k, puede operarse, en vistas a una medición ulterior, como si la función de onda efectiva del objeto fuese ψ_k. Esto último garantiza la repetibilidad de los resultados de la medición y completa la prueba de la equivalencia empírica entre la mecánica bohmiana y el enfoque mecánico-cuántico estándar.

En síntesis, la estrategia mediante la cual la mecánica bohmiana logra su adecuación empírica es la siguiente. Se asume, en primer lugar, la tesis posicionista de acuerdo con la cual los resultados de cualquier medición se registran siempre en términos de la posición del puntero del aparato al término de la medición considerada. El postulado estadístico, junto con el modo natural de actualizar la probabilidad epistémica tras una observación, es equivalente a la regla de Born del enfoque mecánico-cuántico estándar y asegura, por tanto, que la mecánica bohmiana y el enfoque mecánico-cuántico estándar hacen exactamente las mismas predicciones *respecto de la* *posición*. Ahora bien, bajo la asunción posicionista que se acaba de mencionar, la equivalencia empírica respecto de la posición garantiza la equivalencia empírica *tout court*. Y si, finalmente, se asume que el enfoque mecánico-cuántico estándar es adecuado empíricamente, entonces la equivalencia empírica de éste con la mecánica bohmiana implica que esta última también lo es.

2 Enfoque del potencial cuántico versus enfoque de guía

2.1 Enfoque de potencial cuántico y explicación

Bohm presentó su teoría de variables ocultas en dos artículos aparecidos en 1952 (cf. Bohm, 1952a, 1952b). En un artículo publicado un año después, en el que el autor responde a algunas de las primeras objeciones que se le plantearon, éste procede a resumir su propuesta del siguiente modo:

> El autor [Bohm] ha propuesto una interpretación causal de la teoría cuántica basada en las siguientes hipótesis:
>
> (A) Un sistema mecánico-cuántico, tal como un electrón, consta básicamente de una partícula que tiene una posición definida de forma precisa y que varía de modo continuo en función del tiempo.
> (B) Sobre esta partícula actúan no sólo el potencial clásico $V(x,t)$, sino un potencial cuántico adicional $U(x,t)$ que es importante a nivel atómico pero despreciable a nivel macroscópico.
> (C) Si escribimos $\psi = \mathbf{R}e^{i\mathbf{S}(x,t)/\hbar}$, donde ψ es la función de onda, y R y S son [funciones] reales, entonces el potencial cuántico viene dado por la expresión
>
> (C1) $$\mathbf{U}(x,t) = -\left(\frac{\hbar^2}{2\mathbf{m}}\right)\frac{\nabla^2\mathbf{R}(x,t)}{\mathbf{R}(x,t)}\ .$$
>
> La ecuación del movimiento de la partícula toma entonces la forma
>
> (C2) $$\mathbf{m}\frac{\mathbf{d}^2x}{\mathbf{d}t^2} = -\nabla\left(\mathbf{U}(x,t) + \mathbf{V}(x,t)\right)\ .$$
>
> Para obtener las mismas predicciones experimentales que se obtienen de la interpretación usual de la teoría cuántica es necesario, no obstante, hacer las tres asunciones especiales adicionales que siguen (...): (1) El campo ψ satisface

la ecuación de Schrödinger; (2) la velocidad de la partícula se restringe a $\mathbf{v} = \nabla \mathbf{S}(\boldsymbol{x}) / \mathbf{m}$; (3) no podemos predecir o controlar la ubicación precisa de una partícula, sino que tenemos una colectividad estadística de partículas cuya densidad de probabilidad es $P(x) = |\psi(x)|^2$ (Bohm, 1953, p. 458-9).

Las diferencias entre esta caracterización de la teoría y la "versión mínima", discutida en la sección anterior, son evidentes. Así, de acuerdo con la formulación de Bohm, la ecuación fundamental del movimiento de las partículas tiene la forma:

$$\mathrm{m}_k \frac{\mathrm{d}^2 Q_k}{\mathrm{d}t^2} = -\vec{\nabla}_k \left(\mathrm{U}(q,t) + \mathrm{V}(q,t) \right)\Big|_{q=Q}, \qquad (2.1)$$

y difiere de la segunda ley de Newton por la adición del término:

$$\mathrm{U}(q,t) \equiv -\sum_k \left(\frac{\hbar^2}{2\mathrm{m}_k} \right) \frac{\vec{\nabla}_k{}^2 \mathrm{R}(q,t)}{\mathrm{R}(q,t)}, \qquad (2.2)$$

que tiene la dimensión de un potencial y depende del módulo de la función de onda. En adelante, me referiré a (2.1) como la "segunda ley de Newton generalizada" (SLNG) y, siguiendo el uso de Bohm, denominaré "potencial cuántico" al término (2.2). Debe notarse que ni la SLNG ni el potencial cuántico aparecen entre los postulados de la versión mínima de la mecánica bohmiana. Además, tres de los postulados de la versión mínima (la ecuación de Schrödinger, la ecuación guía y el postulado estadístico) son considerados por Bohm como "asunciones especiales adicionales".

Esta divisoria interpretativa no es otra que la que he mencionado en la introducción entre los partidarios del enfoque del potencial cuántico de la mecánica bohmiana y los partidarios del enfoque de guía. De acuerdo con los primeros, la ecuación fundamental del movimiento de las partículas bohmianas es la SLNG y nociones de segundo orden como "fuerza", "aceleración", "energía" y "potencial" desempeñan un papel privilegiado en la teoría. Por el contrario, los partidarios del enfoque de guía rechazan de modo explícito el recurso al potencial cuántico y a la SLNG y argumentan que el contenido de la mecánica bohmiana está convenientemente capturado por los cuatro postulados de la versión mínima. Así, desde la perspectiva de estos últimos, las partículas bohmianas evolucionan en el tiempo de acuerdo con la ecuación guía, siendo la noción de "velocidad" – el ritmo de cambio de posición – la noción dinámica fundamental de la teoría.[6]

6 En la literatura, destacan entre los partidarios del enfoque del potencial cuántico el propio Bohm y su equipo de colaboradores. A este respecto, además de los artículos seminales de la mecánica bohmiana (Bohm, 1952a, 1952b), debe mencionarse Bohm y Hiley (1993). Holland (1993) constituye el manual de mecánica bohmiana más extenso

Dado que ambos enfoques de la mecánica bohmiana postulan una ley diferente para el movimiento de las partículas bohmianas, cabe preguntarse si dichos enfoques son siquiera compatibles. La respuesta es que sí lo son y que las discrepancias operan meramente en el plano de la interpretación. Para darse cuenta de ello hay que atender a la particular relación que la SLNG y la ecuación guía guardan entre sí.

La SLNG puede ser obtenida a partir de la ecuación de Schrödinger y la ecuación guía, realizando manipulaciones algebraicas y derivando (cf. Holland, 1993, p. 278-80). Se sigue de ello que, si bien todas las soluciones de la ecuación guía son, a su vez, soluciones de la SLNG, *no* todas las soluciones de la SLNG son soluciones de la ecuación guía. Dicho de otro modo, el conjunto de movimientos permitidos por la ecuación guía es un subconjunto propio del conjunto de movimientos permitidos por la SLNG, siendo esta última ecuación, por lo tanto, más general que la primera.[7] Así, los partidarios del enfoque del potencial cuántico, *no* interpretan la ecuación guía como una ley dinámica adicional, si no como una *regla de selección* que restringe y descarta como imposibles algunas de las trayectorias permitidas por la SLNG.[8]

Debe notarse que la ecuación guía – aún interpretada como regla de selección que restringe el momento inicial de las partículas bohmianas – es absolutamente necesaria para la adecuación empírica y la consistencia de la teoría, puesto que las trayectorias seleccionadas por dicha ecuación son las únicas compatibles con el postulado estadístico. Se suscita entonces la cuestión de por qué los partidarios del enfoque del potencial cuántico deciden recurrir a una ecuación más compleja y postularla como fundamental. El principal argumento a favor del enfoque del potencial cuántico está relacionado con la *explicación*, pues los partidarios de dicho enfoque consideran que éste tiene un poder explicativo mayor que el enfoque de guía.

Para ilustrar dicho argumento, puede considerarse, por ejemplo, el célebre experimento de la doble rendija.[9] De acuerdo con la mecánica bohmiana, cuando ambas rendijas están abiertas, el patrón de posibles trayectorias de la partícula-prueba (en función de su posición inicial en el plano de las rendijas) es el representado en la Fi-

hasta la fecha y también está articulado desde la perspectiva del enfoque del potencial cuántico. Como partidarios del enfoque de guía, destacan Bell (1990), Valentini (1992, 1997) y Dürr *et al.* (1992).

7 Este hecho puede ser apreciado intuitivamente si se considera la forma de las dos ecuaciones en juego. La SLNG suministra la *aceleración* de la partícula y, por tanto, para hallar una solución hay que indicar dos condiciones de contorno, típicamente, la posición y la velocidad de la partícula en un tiempo inicial. Sin embargo, puesto que la ecuación guía suministra directamente la *velocidad* de la partícula, desde la perspectiva de esta última ecuación, sólo la posición inicial (y no la velocidad) es contingente.

8 Es precisamente por este motivo que, en la cita que hemos reproducido, Bohm se refiere a $\mathbf{v} = \nabla S(\mathbf{x}) / m$ como una "restricción".

9 Para un análisis detallado de este experimento desde la perspectiva del enfoque mecánico-cuántico estándar, recomendamos la celebrada exposición de Feynman (1963, cap. 37). Para un análisis desde una perspectiva bohmiana, véase Philippidis *et al.* (1979) o Holland (1993, p. 173 ss.).

gura 1. Nótese como hay regiones de la pantalla detectora en las que arriban muchas trayectorias y otras en las que no llega prácticamente ninguna. Claramente, dicho patrón de trayectorias da cuenta de por qué, tras muchas repeticiones del experimento, se obtiene la característica distribución de franjas mecánico-cuánticas.

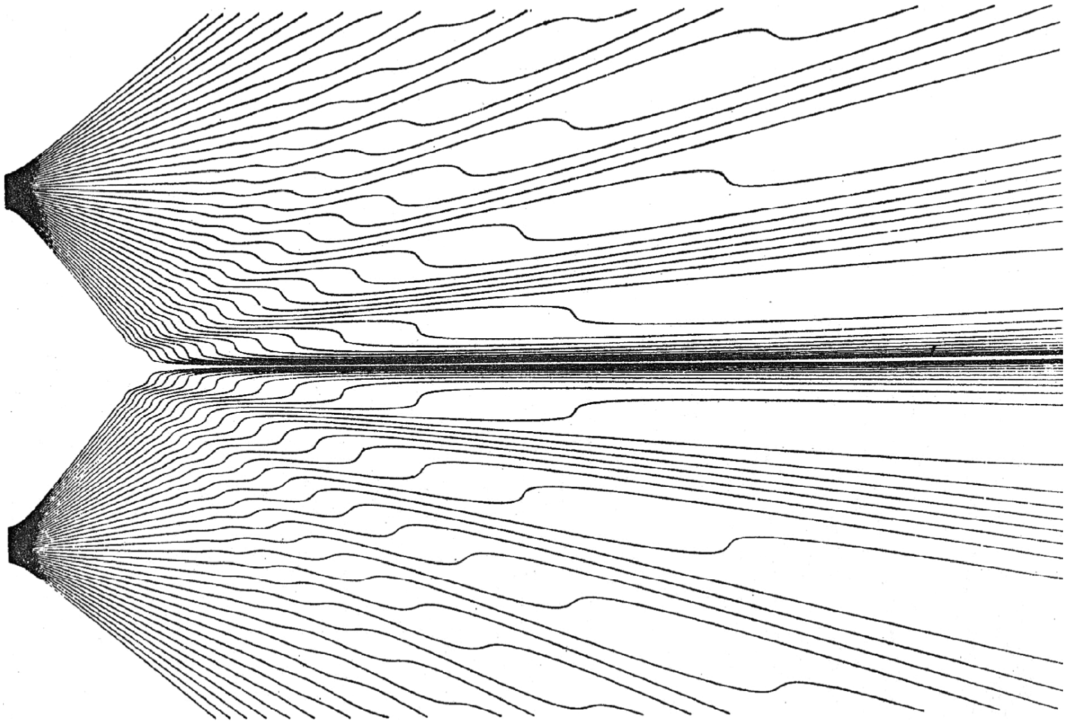

Figura 1. Trayectorias bohmianas del experimento de la doble rendija en el caso en que ambas rendijas están abiertas. Extraída de Philippidis, C. *et al*. (1979).

A la vista del patrón de trayectorias de la figura 1, es natural preguntarse por qué, cuando ambas rendijas están abiertas, la partícula-prueba describe la suerte de curiosos vaivenes representados en lugar de, por ejemplo, ir en línea recta. Esta cuestión puede responderse aduciendo que las trayectorias bohmianas son como son puesto que así lo sanciona la ecuación guía cuando se considera la función de onda adecuada. Sin embargo, el recurso al potencial cuántico permite ofrecer una explicación más profunda o, cuando menos, más familiar.

Entre el plano de las rendijas y la pantalla detectora no hay ningún campo clásico y, por tanto, el potencial clásico es constante; sin embargo, el potencial cuántico tiene la forma de una función oscilante con una serie de picos y valles distribuidos a lo largo del plano de la pantalla detectora, tal y como puede verse en la figura 2. De acuerdo con la SLNG, dicho potencial da lugar a un campo de fuerzas que atraen a la partícula-prueba hacia ciertas regiones de la pantalla y que evitan que dicha partícula pueda alcanzar otras regiones. Así pues, el potencial cuántico y las fuerzas que tiene origen en dicho potencial permite ofrecer una explicación causal en términos físicos de la particular forma que adquieren las trayectorias bohmianas cuando ambas rendijas están abiertas.

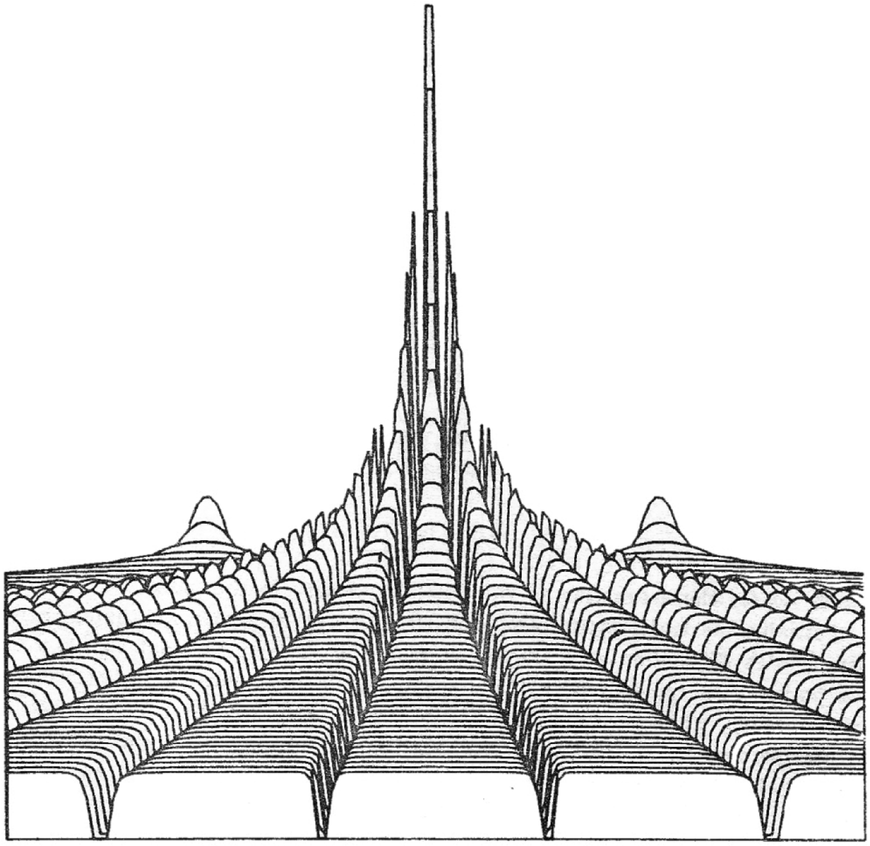

Figura 2. El potencial cuántico en el experimento de la doble rendija visto desde la pantalla detectora. Extraída de Philippidis, C. ***et al.*** **(1979).**

La moraleja que cabe extraer de esta ilustración es que, en virtud de la SLNG y del potencial cuántico, el movimiento de las partículas bohmianas puede explicarse en función de los mecanismos clásicos de atracción y repulsión, implementándose en la teoría, de este modo, el rico acervo de recursos explicativo-causales propios de la mecánica clásica. Es por ello que los partidarios del enfoque del potencial cuántico defienden que, aunque el recurso a la SLNG y al potencial cuántico pueda considerarse superfluo desde el punto de vista del contenido empírico de la teoría, *no* lo es desde el punto de vista de la ontología y de la explicación. Este hecho justificaría, en última instancia, la superioridad del enfoque.[10]

2.2 Enfoque de guía y explicación

Lo que para los partidarios del enfoque del potencial cuántico es una virtud, es percibido por los partidarios del enfoque de guía como un defecto. Así, por ejemplo, Goldstein (1996) se muestra disconforme con el hecho de que la tan cacareada revolución conceptual cuántica consista meramente en añadir a una ontología clásica una fuerza de origen genuinamente cuántico. A juicio de este autor, la verdadera revolución implicada por la mecánica bohmiana supone, más bien, una vuelta al aristotelismo. Valentini (cf. 1992, 1996, 1997) también reconoce la presencia de ingredientes aristotélicos en la mecánica bohmiana y, en lo que sigue, me voy a centrar en la propuesta de dicho autor.

Para Valentini, la función de onda – también denominada "onda piloto" – es una entidad fundamental de la teoría y puede ser interpretada como un campo de *causa formal* aristotélica.

> La interpretación más sucinta de ψ, libre de complicaciones pero que hace justicia a su significación física, es con seguridad la de un campo de causa formal en el sentido aristotélico. De este modo, es justificado referirse a ψ como un campo de información que "informa" la evolución temporal X(t) (Valentini 1992, p. 17).

Aquí no me interesa ahondar en esta intrigante sugerencia, sino en un segundo ingrediente "aristotélico" que el autor localiza en el seno del enfoque de guía de la

10 Conviene notar que, en la literatura, se han aducido al menos dos argumentos adicionales en favor del enfoque del potencial cuántico. El primero de ellos está relacionado con el límite clásico de la teoría. Puesto que la SLNG coincide con la segunda ley de Newton, excepto por el postulado de la fuerza derivada del potencial cuántico, resulta evidente que las partículas bohmianas se comportarán de modo clásico en aquellas situaciones en que el potencial cuántico sea constante. Puesto que las condiciones bajo las cuales la ecuación guía prescribe movimientos clásicos distan de ser evidentes, desde la perspectiva del enfoque de guía, la obtención del límite clásico es más difícil de explicar. En segundo lugar, el enfoque del potencial cuántico ha sido defendido por su mayor versatilidad. Puesto que la "restricción" $\vec{v}_k = \vec{\nabla}_k S / m_k$ se introduce junto con el postulado estadístico solamente para garantizar la equivalencia empírica con el enfoque mecánico-cuántico estándar, pero ni la primera ni el segundo son necesarios para una teoría consistente del movimiento de las partículas, el enfoque del potencial cuántico permite desechar tentativamente ambas asunciones e investigar las mayores posibilidades dinámicas entrañadas por la SLNG, para explorar sus eventuales consecuencias en un dominio en el que la teoría cuántica resulte inadecuada. Bohm, preocupado siempre por la extensión de sus propuestas para cubrir nuevos dominios de fenómenos, consideraba este argumento como fundamental e insistió en el mismo con particular énfasis en sus trabajos más tempranos.

mecánica bohmiana.[11] Así, Valentini considera que la acción del campo cuántico sobre las partículas puede interpretarse como involucrando la operación de agentes o causas del movimiento de tipo aristotélico.

> El hecho de que la velocidad se obtenga en todo instante como el gradiente de la fase de la función de onda es suficiente para determinar el movimiento de cualquier sistema. *El razonamiento sobre las causas no tiene porque basarse en "fuerzas" proporcionales a la aceleración; el agente que "causa el movimiento" bien puede ser una "fuerza aristotélica" proporcional a la velocidad* (Valentini, 1996, p. 47; énfasis en el original).

Más concretamente, la propuesta de Valentini consiste en interpretar el gradiente $\vec{\nabla}_k S$, que aparece en el lado derecho de la ecuación guía, como una "fuerza aristotélica" que, teniendo su origen en el campo cuántico, actúa sobre la k-ésima partícula del sistema y es proporcional a su velocidad.

Para caracterizar mejor la propuesta de Valentini y la consiguiente dialéctica con los partidarios del enfoque del potencial cuántico, conviene recapitular brevemente el marco explicativo y ontológico de la mecánica de Newton. De acuerdo con dicho marco, el mundo está compuesto de partículas (puntos-masa) y fuerzas que son interpretadas, precisamente, como las *causas* del (cambio) de movimiento de las partículas. Las fuerzas newtonianas son proporcionales a la aceleración, pero se distinguen de las aceleraciones que provocan del mismo modo que las causas se distinguen de sus efectos. Cuando se tienen en cuenta todas las fuerzas newtonianas en juego, se obtiene una imagen causal completa de la situación y, por tanto, una explicación completa de la misma.[12] Puesto que el enfoque del potencial cuántico de la mecánica bohmiana postula fuerzas newtonianas para dar cuenta de los fenómenos cuánticos, los partidarios de dicho enfoque consideran que éste importa el rico acervo de recursos explicativos clásicos, aventajando por este motivo al enfoque de guía en poder explicativo.

Valentini sostiene, sin embargo, que el enfoque de guía no es deficitario desde el punto de vista de la explicación sino que implementa un marco explicativo-causal diferente. Como acabo de indicar, de acuerdo con dicho marco, las trayectorias de las partículas bohmianas se explican en virtud de un conjunto de "fuerzas aristotélicas" que tienen su origen en el campo cuántico y son proporcionales a la velocidad de las

11 Para una crítica de la sugerencia de Valentini de acuerdo con la cual la función de onda puede interpretarse como un campo de causa formal aristotélica, véase Belousek (2003, p. 146).

12 La existencia de las fuerzas newtonianas y su interpretación como causas del movimiento de las partículas ha dado lugar a una apasionante discusión en la literatura. Para una defensa de la existencia de dichas fuerzas y de su rol causal, cf. Wilson (2007).

partículas sobre las que se aplican. Dichas "fuerzas aristotélicas" deben distinguirse de las velocidades que provocan del mismo modo que las fuerzas newtonianas deben distinguirse de las aceleraciones que provocan. Puesto que la ecuación guía provee todas las "fuerzas aristotélicas" que determinan el movimiento de las partículas, dicha ecuación suministra una explicación causal completa. Sólo en virtud de un prejuicio basado en la costumbre podrá objetarse que este modelo explicativo-causal es deficiente y que el modelo explicativo clásico suministrado por el enfoque del potencial cuántico es superior.[13]

Si las fuerzas o causas del movimiento fuesen proporcionales a la velocidad, podría distinguirse el estado de reposo (absoluto) que se correspondería, naturalmente, con el estado de una partícula sobre la que no actúa ninguna "fuerza". En este sentido, pudiera parecer que la interpretación de los vectores $\vec{\nabla}_k S$ que aparecen en el lado derecho de la ecuación guía como "fuerzas aristotélicas", es incompatible con la invariancia galileana de la mecánica bohmiana (cf. Holland, 1993, p. 122 ss.), puesto que el sentido mismo de dicha invariancia es que, si las ecuaciones de la teoría son válidas en un determinado sistema de referencia, lo son también en cualquier otro que se aleje a una velocidad constante del primero, no pudiéndose distinguir entre ambos.[14]

Valentini es consciente de esta dificultad y, de hecho, está de acuerdo en que no cabe postular "fuerzas" o causas proporcionales a la velocidad en el seno de una teoría que cuente con la invariancia galileana entre sus simetrías *fundamentales*. Pero, lejos de retractarse de su interpretación, insiste en el carácter "aristotélico" del enfoque de guía y dedica un artículo entero (cf. Valentini, 1997) a argumentar que, en el marco de dicho enfoque, la invariancia galileana de la teoría no es una simetría fundamental sino que constituye una simetría *ficticia*.

Valentini considera que la estructura del espacio-tiempo bohmiano puede caracterizarse como el producto cartesiano $E \times E^3$ de una línea temporal euclidiana con un espacio tridimensional euclidiano, siendo sus simetrías fundamentales las traslaciones espaciales y temporales, y las rotaciones en el espacio tridimensional. Intuitivamente, este espacio bohmiano puede imaginarse como repleto de éter, de modo que cualquier movimiento respecto de dicho éter debe ser necesariamente causado por una fuerza.

13 Esta proclama de afinidad entre la mecánica bohmiana y la doctrina aristotélica sobre el movimiento y sus causas debe ser cualificada. Aristóteles nunca desarrolló una teoría matematizada del movimiento y hay aspectos fundamentales de su doctrina como el rechazo a la acción a distancia que son totalmente incompatibles con la mecánica bohmiana. Ahora bien, es cierto que en la obra de Aristóteles pueden encontrarse fragmentos donde éste considera explícitamente que la fuerza o causa del movimiento es proporcional a la velocidad y es harto conocido que la idea de que todo estado de movimiento diferente del reposo necesita de un agente fue creencia común antes de Galileo. Es sólo en este último respecto que me interesa considerar ingredientes aristotélicos en el seno de la mecánica bohmiana.
14 Brown *et al.* (1996, p. 317) critican la propuesta de Valentini precisamente en estos términos.

Sea Σ un sistema de referencia que se encuentra en reposo respecto del éter bohmiano. Si S es la fase de función de onda evaluada en dicho sistema de referencia, las "fuerzas aristotélicas" $\vec{\nabla}_k \mathrm{S}$ son, de acuerdo con Valentini, "fuerzas aristotélicas" reales. Ahora bien, para garantizar la invariancia galileana de la teoría, es lugar común asumir que la fase de función de onda evaluada en un sistema de referencia Σ' cuyo origen se mueve con velocidad constante $\vec{\mathrm{V}}=(\mathrm{V}_1, \mathrm{V}_2, \mathrm{V}_3)$ respecto del origen de Σ es:

$$\mathrm{S}'=\mathrm{S}+\frac{1}{2}\sum_{k=1}^{N}\mathrm{m}_k\,\mathrm{V}^2 t-\sum_{k=1}^{N}\mathrm{m}_k\vec{\mathrm{V}}\cdot q_k\ . \tag{2.3}$$

Esta trasformación implica, a su vez, que el gradiente de la fase de la función de onda se transforma de acuerdo a la siguiente relación:

$$\vec{\nabla}'_k \mathrm{S}' = \vec{\nabla}_k \mathrm{S} - \mathrm{m}_k \vec{\mathrm{V}}\ . \tag{2.4}$$

Para Valentini, la "fuerza aristotélica" $-\mathrm{m}_k\vec{\mathrm{V}}$ en (2.4) no es una "fuerza aristotélica" real sino una "fuerza aristotélica" ficticia que permite aplicar la ecuación guía en el sistema de referencia en movimiento respecto del éter Σ'. Y la transformación (2.3) no captura una simetría real de la función de onda que, en realidad, se transforma como un campo escalar. En este sentido, el caso es completamente análogo a cuando, en mecánica clásica, se introducen fuerzas ficticias como la fuerza centrífuga o la fuerza de Coriolis para poder aplicar las leyes de Newton en sistemas de referencia no inerciales.

El *quid* de la cuestión, según Valentini, es que mientras que en el caso clásico tenemos un criterio para distinguir las fuerzas reales de las ficticias, esto *no* es así en el caso bohmiano. Así, en el caso clásico las fuerzas ficticias se distinguen de las fuerzas reales porque desconocemos su origen y porque no satisfacen ciertas características que, en mecánica clásica, se asume de modo implícito que toda fuerza *real* debe de satisfacer. Entre esas características se cuentan, principalmente, la asunción de que las fuerzas (reales) que se aplican sobre una partícula tienen su origen en otra partícula y que la intensidad de las fuerzas reales disminuye siempre con la distancia al origen. De este modo, el movimiento de una partícula suficientemente alejada del resto siempre puede tomarse como un estándar de movimiento no forzado.

En mecánica bohmiana, sin embargo, tanto las fuerzas newtonianas, que aparecen en el lado derecho de la SLNG, como las "fuerzas aristotélicas", que aparecen en el lado derecho de la ecuación guía, *no* satisfacen generalmente estos requisitos. En primer lugar, no cabe sostener que las fuerzas bohmianas sean inter-particulares dos a dos puesto que dependen del campo cuántico y, por tanto, son fuerzas multi-particulares. En segundo lugar, las fuerzas bohmianas no decaen generalmente con la distancia y, por tanto, el movimiento de una partícula suficientemente alejada del resto no puede tomarse como estándar de movimiento no forzado.

En definitiva, pues, los criterios que nos permiten distinguir las fuerzas ficticias de las reales en el contexto mecánico-clásico no son aplicables en el contexto bohmiano. Según Valentini, en este último contexto, no disponemos de ninguna convención para distinguir las "fuerzas aristotélicas" *ficticias* de las "fuerzas aristotélicas" *reales* y es debido a esto que el estado de reposo no puede ser efectivamente detectado.

3. Entidades bohmianas y tridimensionalismo

Habiendo discutido las diferencias entre los enfoques del potencial cuántico y de guía, exploraré, a continuación, las posibilidades interpretativas de la mecánica bohmiana en relación con las entidades postuladas por la teoría. Puesto que acabamos de ver que el enfoque de guía y el enfoque del potencial cuántico difieren precisamente en la ontología y los modos de explicación, no deberá sorprendernos si esta divisoria interpretativa se vuelve relevante en la presente discusión.

Recuérdese que, de acuerdo con el primer postulado de la mecánica bohmiana, para caracterizar por completo un sistema físico de N partículas, hay que precisar el par (Q, Ψ), en donde:

$$\begin{aligned} &Q \equiv (Q_1(t), \ldots, Q_N(t)), Q_k \in \mathrm{R}^3 \\ &\Psi \equiv \Psi(q,t), q \equiv (q_1, \ldots, q_N) \in \mathrm{R}^{3N}. \end{aligned} \tag{3.1}$$

Tanto la ecuación guía como la SLNG sancionan que la evolución temporal de las cantidades $Q_k(t)$ depende de la función de onda. Este esquema sugiere una ontología dualista que comprende, por un lado, partículas con posiciones siempre bien definidas y, por otro, un campo físico que mueve las partículas y que es representado en la teoría por la función de onda o alguna otra función adecuada del *espacio de configuración*. Así, son muchos los que han interpretado la teoría como postulando la existencia de entidades en el espacio de configuración, propiciando el tópico de que la mecánica bohmiana está necesariamente comprometida con una ontología $3N$-dimensional.

Aquellos autores que consideran que la tupla $(Q_1(t), \ldots, Q_N(t))$ especifica las posiciones de N partículas en el espacio físico tridimensional y que la función Ψ representa un campo real en el espacio de configuración, están postulando una *ontología mixta* de acuerdo con la cual lo real se despliega en dos canchas distintas, el espacio físico tridimensional y el espacio de configuración (cf. Bohm & Hiley, 1993; Holland, 1993). Alternativamente, algunos intérpretes defienden que la mecánica bohmiana está comprometida solamente con la existencia del espacio de configuración. Para estos últimos, la tupla $(Q_1(t),...,Q_N(t))$ especifica la posición de una *única* partícula – la partícula universal – en el espacio de configuración. Albert (1996) es quizás quien con más vehemencia ha defendido esta ontología.

Tanto el postulado de una ontología mixta como de una ontología puramente $3N$-dimensional plantea problemas. El partidario de una ontología mixta puede dar cuenta trivialmente del carácter tridimensional de nuestra percepción asumiendo que ésta sobreviene sobre las partículas bohmianas (o sus propiedades), cuya naturaleza es efectivamente tridimensional. Ahora bien, el partidario de una ontología mixta tiene dificultades para explicar de qué modo el campo cuántico puede ejercer una influencia causal sobre las partículas siendo que campo y partículas habitan espacios diferentes.

Los problemas se invierten para el partidario de una ontología puramente $3N$-dimensional. Para éste, la comunicación entre el campo y la partícula (universal) no plantea dificultad alguna, puesto que ambas entidades habitan en un mismo espacio, a saber, el espacio de configuración. Por el contrario, su desafío es explicar por qué el mundo nos parece tridimensional (y multi-particular) cuando es en realidad $3N$-dimensional y contiene una sola partícula. Albert (1996) ofrece un argumento a este efecto que ha desatado un interesante debate en la literatura acerca de la plausibilidad de una ontología $3N$-dimensional.[15]

Mi propósito aquí no es analizar los argumentos a favor o en contra de una ontología $3N$-dimensional, sino mostrar – en contra del tópico – que hay interpretaciones "tridimensionalistas" de la mecánica bohmiana, esto es, interpretaciones de la teoría que no están comprometidas con la existencia de entidades físicas en el espacio de configuración y, por ende, con la existencia del mismo espacio de configuración como cancha de lo real. Con ello habré mostrado que la mecánica bohmiana provee un marco interpretativo suficientemente versátil como para dar acomodo tanto a los que creen que una ontología $3N$-dimensional es plausible como los que creen que es insostenible.

Debe notarse, además, que las interpretaciones tridimensionalistas de la mecánica bohmiana no presentan ninguna de las dos dificultades que acabo de mencionar. Puesto que sólo postulan una cancha para lo real – el espacio físico tridimensional –, no se plantean problemas de "comunicación" entre entidades que habitan espacios distintos. Puesto que dicha cancha es tridimensional, estas interpretaciones pueden dar cuenta trivialmente del carácter tridimensional de nuestra experiencia.

Belousek (2003) realiza una interesante exploración de las latitudes interpretativas de la mecánica bohmiana, con el objetivo de encontrar una interpretación de la

15 Además de Albert, Lewis (2004) defiende, con argumentos distintos, la plausibilidad de una ontología del espacio de configuración. Monton (2002, 2004) argumenta en contra.

teoría que postule una ontología aceptable y que sea adecuada desde el punto de vista de su poder explicativo. Este autor considera que sólo una ontología tridimensional es plausible, tal y como se desprende de sus tres *desiderata* para una interpretación satisfactoria de la mecánica bohmiana (cf. Belouzek, 2003, p. 128):

(i) todas las entidades postuladas deben existir en el espacio físico tridimensional;
(ii) la función de onda Ψ debe, de algún modo, ser interpretada en términos físicos (y no meramente estadísticos) y
(iii) la interpretación física de la función de onda debe proveer una explicación adecuada de los fenómenos cuánticos.

Puesto que Belousek comparte mi mismo propósito de investigar interpretaciones tridimensionalistas de la mecánica bohmiana, en adelante proseguiré en clara dialéctica con su trabajo. La primera interpretación tridimensionalista discutida por Belousek es el "monismo de partículas" de Dürr y colaboradores (1992, 1997). De acuerdo con estos autores, la mecánica bohmiana es una teoría sobre el movimiento de partículas en el espacio tridimensional *y nada más*. La función de onda es desprovista de toda realidad física e interpretada como un parámetro abstracto que está en las leyes. Además, Dürr y colaboradores están explícitamente comprometidos con el enfoque de guía pues rechazan de modo expreso nociones de segundo orden como "fuerza", "energía" y "potencial" y objetan también cualquier referencia a la SLNG.

Belousek critica el monismo de partículas por tratarse de una interpretación carencial desde el punto de vista de su poder explicativo. El argumento de este autor puede ilustrarse considerando, por ejemplo, el experimento de la doble rendija discutido en la sección anterior. Para Belousek, una interpretación adecuada de la mecánica bohmiana debe suministrar una explicación en términos físicos de los vaivenes de la partícula-prueba en su camino hacia la pantalla detectora. Ahora bien, puesto que el monismo de partículas no postula ninguna otra entidad física aparte de las partículas, Belousek considera que dicha interpretación no puede proveer tal explicación, violando el *desideratum* (iii).

En la sección anterior, he mostrado cómo, desde la perspectiva del enfoque del potencial cuántico, los vaivenes descritos por la partícula-prueba, cuando ambas rendijas están abiertas, se explican en virtud del potencial cuántico y de las fuerzas (newtonianas) que tienen su origen en dicho potencial. En este caso, pues, no hay dificultad alguna en relación con la explicación. El problema que presenta una versión ontológicamente robusta del enfoque del potencial cuántico es su compromiso con la existencia de entidades en el espacio de configuración, tales como la función de onda o el potencial cuántico. El propósito de Belousek es, pues, mantener parte del poder explicativo de una versión robusta del enfoque del potencial cuántico, pero asegurando la compatibilidad con el *desideratum* tridimensionalista. Y, como se verá a continuación, la solución que propone es bien sencilla.

Recuérdese que el vector $-\vec{\nabla}_k(V+U)$ que aparece en el lado derecho de la SLNG se interpreta naturalmente como una fuerza *tridimensional* que actúa sobre la k-ésima partícula del sistema y es proporcional a la aceleración de dicha partícula. La estrategia de Belousek consiste en retener estas fuerzas, pero interpretándolas como ontológicamente primitivas, en lugar de considerar que tienen su origen en la función de onda o en el potencial cuántico.[16]

> De acuerdo con esta interpretación, las fuerzas cuánticas no tendrían su origen en el estado cuántico, puesto que es precisamente la interpretación del estado cuántico como una entidad subsistente en sí misma la que está siendo negada aquí. En su lugar, las fuerzas existirían por su cuenta junto con las partículas, y entidades reales de estos dos tipos existirían en el espacio físico tridimensional. Estaríamos, entonces, ante una ontología genuinamente dualista – fuerzas y partículas equiprimordiales. Por supuesto, no hay aquí explicación alguna acerca del origen de dichas fuerzas; y, por supuesto, la noción de "fuerza primitiva" sigue siendo tan misteriosa como lo era para Newton y sus contemporáneos (Belousek, 2003, p. 163).

La interpretación de Belousek satisface las tres *desiderata* planteadas por el autor, puesto que (i) no se postulan entidades en el espacio de configuración, (ii) al aparecer como parámetro en las fuerzas tridimensionales, $-\vec{\nabla}_k(V+U)$, la función de onda no es interpretada en términos meramente estadísticos y (iii) las trayectorias de las partículas se explican físicamente en virtud de dichas fuerzas. En este sentido, pues, podría considerarse que la interpretación de Belousek es superior al monismo de partículas de Dürr y colaboradores, que *no* satisface las tres *desiderata*. Puesto que la propuesta de Belousek opera en el enfoque del potencial cuántico de la mecánica bohmiana, mientras que la interpretación Dürr y colaboradores se encuadra en el enfoque de guía, lo anterior podría llevar a concluir, adicionalmente, que el enfoque del potencial cuántico tiene mejores perspectivas que el enfoque de guía, cuando se trata de acomodar una interpretación tridimensionalista de la mecánica bohmiana, que sea adecuada

16 Conviene notar que Belousek no es completamente original en este punto, pues la posibilidad de aceptar la existencia de las fuerzas tridimensionales que aparecen en el lado derecho de la SLNG, descartando la realidad física del campo cuántico, ya fue apuntada por Margenau (1954, p. 8).

desde el punto de vista de la explicación. A continuación, deseo argumentar en contra de esta conclusión.

En primer lugar, hay que señalar que el monismo de partículas no es tan deficitario desde el punto de vista de la explicación como pretende Belousek. Ciertamente, si la noción de "explicación" se restringe de modo que el comportamiento de una entidad física sólo puede explicarse en virtud de la influencia causal ejercida por otras entidades físicas, entonces el monismo de partículas sale peor parado en términos de poder explicativo que la propuesta interpretativa de Belousek. Sin embargo, hay otras concepciones acerca de la naturaleza de la explicación que Belousek no contempla. Por ejemplo, cabe recurrir a una suerte de realismo nomológico e interpretar la función de onda como un parámetro en las leyes, considerando entonces que las trayectorias bohmianas se explican en virtud de dichas leyes. Dürr y colaboradores (1997) defienden precisamente esa estrategia.

Por otro lado, incluso si se acepta una noción de explicación como la planteada por Belousek, no se sigue de ello que el enfoque del potencial cuántico tenga mejores perspectivas que el enfoque de guía, para acomodar una interpretación tridimensionalista de la mecánica bohmiana adecuada desde el punto de vista de la explicación. Esto es así porque puede concebirse una interpretación tridimensionalista alternativa, que opere en el seno del enfoque de guía y que sea tan satisfactoria desde el punto de vista de su poder explicativo como la interpretación de Belousek.

La interpretación de la mecánica bohmiana a la que me refiero consiste en asumir una ontología dualista que incluye, por un lado, las partículas bohmianas en el espacio tridimensional y, por otro, el conjunto de "fuerzas aristotélicas" que actúan sobre las partículas de acuerdo con lo prescrito por la ecuación guía. Siguiendo la misma estrategia que aplica Belousek, estas "fuerzas" son consideradas como *primitivas* tanto desde el punto de vista de la ontología como del punto de vista de la explicación, puesto que en esta interpretación se niega explícitamente la existencia del campo cuántico, de su fase S y de cualquier otra entidad en el espacio de configuración. En definitiva, la propuesta interpretativa que estoy sugiriendo es análoga a la de Belousek, pero allí donde éste alude a las fuerzas newtonianas que aparecen en el lado derecho de la segunda ley de Newton generalizada, yo aludo a las "fuerzas aristotélicas" que aparecen en el lado derecho de la ecuación guía.

De acuerdo con esta última propuesta interpretativa, (i) no se postula ninguna entidad en el espacio de configuración, (ii) al aparecer como parámetro en las "fuerzas aristotélicas" tridimensionales, $\vec{\nabla}_k S$, la función de onda no es interpretada en términos meramente estadísticos y (iii) las trayectorias de las partículas se explican físicamente en virtud de dichas "fuerzas". Así pues, en la medida en que se acepte el desplazamiento explicativo implicado por el postulado de las causas del movimiento proporcionales a la velocidad, que he discutido en la sección anterior, cabe concluir que esta interpretación es tan satisfactoria desde el punto de vista de la explicación como la de Belousek. Y que, por ende, el enfoque del potencial cuántico no aventaja al enfoque de guía cuando se trata de acomodar una interpretación tridimensionalista de la teoría, adecuada desde el punto de vista de la explicación.

4 Propiedades bohmianas y medición

En la sección anterior, he explorado algunas de las posibilidades interpretativas de la mecánica bohmiana en relación con las *entidades* postuladas, centrándome en la cuestión del tridimensionalismo. A continuación, exploraré interpretaciones de la teoría que discrepan respecto de las *propiedades* que atribuyen a las partículas bohmianas.

El primer postulado de la mecánica bohmiana sanciona que todas las propiedades de un sistema físico cerrado quedan determinadas, si se especifica su función de onda y la configuración (las posiciones) de las partículas del sistema. Así, puede pensarse en el conjunto de todas las configuraciones y de todas las funciones de onda posibles como definiendo el *espacio de estados* de la teoría, y puede pensarse en una propiedad arbitraria del sistema como una función de dicho espacio. Puesto que tanto la configuración como la función de onda dependen, en última instancia, del tiempo y, por tanto, son variables dinámicas, cualquier función de las mismas $f(Q(t),\Psi(Q(t),t))$ constituye también una variable dinámica. Cabe concluir, pues, que, en mecánica bohmiana, las propiedades se representan como variables dinámicas que son funciones del espacio de estados de la teoría,[17] de modo completamente análogo a como se representan en mecánica clásica. Nótese adicionalmente que, de acuerdo con esta estructura representacional, las propiedades bohmianas presentan un régimen de compatibilidad clásico, dado por una lógica que admite los principios de conmutatividad, asociatividad y distributividad.

Ya hemos visto la forma funcional de algunas variables dinámicas bohmianas que se corresponden con propiedades importantes de las partículas. Así, por ejemplo, la ecuación guía establece que la velocidad de una partícula es el gradiente de la fase de la función de onda dividido por su masa:[18]

$$\vec{\mathrm{v}}(\vec{x},\Psi,t)=\vec{\nabla}\mathrm{S}(\vec{x},t)/\mathrm{m}\,. \tag{4.1}$$

17 Aquí nos estamos refiriendo a propiedades como la posición, el momento lineal etc., que son dinámicas, y no a propiedades como la masa o la carga que entran en la teoría como meros parámetros.

18 En lo que sigue consideramos, por simplicidad, un sistema de una única partícula de masa m y cuya posición denotamos con el vector $\vec{x}$.

A su vez, la energía total tiene la siguiente forma funcional:

$$\mathrm{E}(\vec{x},\Psi,t)=\frac{\left(\vec{\nabla}\mathrm{S}(\vec{x},t)\right)^2}{2\mathrm{m}}+\mathrm{V}(\vec{x})-\frac{\hbar^2}{2\mathrm{m}}\frac{\vec{\nabla}^2\mathrm{R}(\vec{x},t)}{\mathrm{R}(\vec{x},t)}, \qquad (4.2)$$

donde pueden distinguirse las contribuciones de la energía cinética, el potencial clásico y, finalmente, el potencial cuántico. Holland (1993, p. 92 ss.) desarrolla una teoría completamente general de atribución de propiedades en mecánica bohmiana de acuerdo con la cual, dado un operador autoadjunto $\hat{\mathrm{O}}$, la variable dinámica

$$\mathrm{O}(\vec{x},\Psi,t)\equiv \mathrm{Re}\left(\Psi^*(\hat{\mathrm{O}}\Psi)\right)/\left|\Psi\right|^2 \qquad (4.3)$$

representa, en mecánica bohmiana, la misma propiedad que en la interpretación mecánico-cuántica ortodoxa es representada por el operador $\hat{\mathrm{O}}$.

En principio, resulta natural interpretar las variables dinámicas (4.3) como representando propiedades reales de las partículas bohmianas. En consecuencia, de acuerdo con esta interpretación, las partículas bohmianas poseen toda la plétora de propiedades clásicas, además de otras propiedades genuinamente cuánticas como la energía potencial cuántica y el *spin*.[19] Por citar sólo algunos autores, Bohm (1952a, 1952b), Bohm e Hiley (1993), Holland (1993) y Belousek (2003) defienden una interpretación de la mecánica bohmiana de acuerdo con estas líneas.

El hecho de que una partícula bohmiana tenga todas las propiedades clásicas bien definidas simultáneamente puede parecer incompatible con el principio de incertidumbre. Sin embargo, debe señalarse que el principio de incertidumbre sólo pone un límite a la precisión con que una variable y la correspondiente variable conjugada pueden ser *medidas* simultáneamente. Y, en mecánica bohmiana, dicho principio se satisface porque, en general, el proceso de medición redunda en una modificación irreducible de la propiedad medida, de modo que el valor preexistente de la propiedad no coincide con el valor de la misma tras la medición. Esto es, a su vez, una consecuencia trivial del hecho de que todas las propiedades bohmianas, con excepción de la posición, son funciones de la función de onda.

19 En sistemas con *spin*, la función de onda no tiene la forma de un campo escalar sino de un *spinor* con varios componentes. Teniendo en cuenta esta modificación, no hay diferencia fundamental entre el *spin* y el resto de propiedades de las partículas, pues el *spin* se representa también como una función de la función de onda y la configuración. Por brevedad, a lo largo de esta sección ignoraré la cuestión del *spin* aunque la consideración del mismo da también lugar a diferentes interpretaciones. Para una discusión del *spin* en mecánica bohmiana, cf. Bohm & Hiley (1993, cap.10), Holland (1993, cap. 9, 10), Pagonis y Clifton (1995).

De acuerdo con la teoría (bohmiana y cuántica) de la medida, la función de onda se modifica de modo fundamental en el transcurso de una medición. Más concretamente, en la primera sección, he mostrado que la función de onda efectiva del subsistema objeto de la medición pasa de tener una forma inicial arbitraria a convertirse en una función propia del operador autoadjunto que se corresponde con la propiedad medida. Ahora bien, dada la dependencia funcional de toda propiedad (excepto la posición) en la función de onda, la modificación de esta última en el trascurso de una medición, conlleva necesariamente la modificación de la propiedad medida. Así pues, el precio que debe pagarse por atribuir a las partículas bohmianas la rica ontología de propiedades clásicas, con un régimen clásico de compatibilidad, se cifra en que dichas propiedades, si bien siempre bien definidas, permanecen necesariamente ocultas y no pueden ser reveladas mediante una medición, que las altera de un modo irreducible.

Esta consecuencia de la teoría puede ejemplificarse mediante la consideración de un sencillo *gedankenexperiment* consistente en una partícula confinada entre dos paredes perfectamente reflectantes y cuyo campo cuántico asociado se encuentra en el estado fundamental.[20] Puesto que, en tal caso, la fase de la función de onda es independiente de las coordenadas espaciales, la ecuación guía sanciona que la partícula se encuentra en reposo. La teoría explica este hecho debido a que la totalidad de la energía de la partícula tiene la forma de energía potencial cuántica.

Ahora bien, la imagen de una partícula en reposo dentro del pozo de potencial puede parecer contradictoria con el hecho de que, si se realiza una medición de su velocidad, se obtiene siempre un valor diferente de cero. Esto es, cuando se observa la partícula, ésta siempre está en movimiento. Desde una perspectiva bohmiana, este hecho se explica porque, para medir la velocidad de la partícula, hay que retirar las paredes que la confinan. Esto, a su vez, acarrea una profunda transformación en el campo cuántico, que deja de estar confinado en el interior del pozo de potencial y se transforma en dos ondas simétricas que se alejan de la región. Esta transformación de la función de onda implica un cambio en la velocidad de la partícula, que pasa de ser cero a tener un valor finito y constante que coincide con el predicho por el enfoque mecánico-cuántico estándar y con el obtenido en una determinación experimental. Claramente, pues, la mecánica bohmiana ofrece una descripción del sistema cuando no está siendo observado y otra – no coincidente con la anterior – del sistema sometido a una observación. Por así decirlo, la teoría nos dice que el mundo cambia de faz cuando lo observamos, porque la inevitable interacción que supone todo proceso de observación modifica lo observado.

20 Para una discusión de este *gedankenexperiment*, desde la perspectiva del enfoque mecánico-cuántico estándar, véase, por ejemplo, Cohen-Tannoudji *et al.* (1997, p. 78).

Autores como Bohm e Hiley (cf. 1993) dan la bienvenida a esta consecuencia de la teoría, sosteniendo que es un reflejo del carácter holístico de nuestro universo y que obliga a reinterpretar los procesos de medición como procesos de "participación", en los que dos subsistemas se afectan de modo recíproco e irreducible. Otros autores, por el contrario, consideran este quiebre epistemológico como una consecuencia inaceptable de la teoría.[21] Existe, sin embargo, una opción intermedia que coincide con Bohm e Hiley en aceptar la teoría y el hecho de que las mal denominadas "mediciones" no son procesos que revelan fiablemente propiedades preexistentes, pero que – contra la interpretación de Bohm e Hiley – degrada el estatuto ontológico de todas las propiedades bohmianas excepto la posición. Esta es la opción interpretativa de Bell, quien declara que

> en mecánica bohmiana, a las partículas *no* se les atribuyen momentos angulares, energías etc., sino solamente posiciones como funciones del tiempo. Los resultados de "mediciones" del momento angular, de la energía etc. emergen como posiciones de los punteros en dispositivos experimentales apropiados (Bell, 1990, p. 39).

En adelante, denominaré "interpretaciones minimalistas" a aquellas interpretaciones de la mecánica bohmiana de acuerdo con las cuales la única propiedad genuina de las partículas bohmianas es la posición (cf. Dürr *et al*., 1992). Hay varios modos de sustanciar este sorprendente aserto.

Brown y colaboradores (1995) argumentan que parámetros tales como la masa y la carga no pueden, en mecánica bohmiana, ser interpretados como propiedades (meramente) de los corpúsculos. De acuerdo con estos autores, ciertas predicciones de la teoría en el contexto de experimentos que involucran el uso de interferómetros no pueden ser reconciliadas con el hecho de que la masa, la carga y el momento magnético estén localizados allí donde se encuentran los corpúsculos. Dado que estos parámetros aparecen también en la ecuación de Schrödinger y, por lo tanto, condicionan la forma de la función de onda, o campo cuántico, se abren dos posibilidades: o bien se interpreta la masa, la carga y el momento magnético como propiedades tanto del campo cuántico como de las partículas, o bien se interpretan como propiedades sólo del campo. Ahora bien, si de acuerdo con este último supuesto – al que Brown y sus colaboradores denominan como el "principio de parsimonia" – la masa no puede ser conside-

21 Este es el caso de Einstein, quien formuló una objeción temprana a la mecánica bohmiana basada, precisamente, en el *gedankenexperiment* que acabo de discutir. Para más información acerca de esta crítica de Einstein, véase Myrvold (2003).

rada una propiedad de los corpúsculos bohmianos, tampoco se les va a poder atribuir momento lineal, momento angular o energía, propiedades todas ellas que dependen de la masa. Así, es en virtud de este principio de parsimonia, que Brown y colaboradores (1996) interpretan el aserto minimalista de que la única propiedad que cabe atribuir a las partículas bohmianas es la posición. Aunque el argumento de Brown y sus colaboradores es relevante, considero que la tesis de Bell, que acabo de citar, apunta en otra dirección y puede sustanciarse, dado el singular estatuto que tiene la posición en mecánica bohmiana, y que diferencia claramente a ésta del resto de propiedades dinámicas de las partículas.

Nótese, en primer lugar, que la posición es la única propiedad de las partículas bohmianas que no depende funcionalmente del campo cuántico y, por ende, de la configuración del resto de partículas del sistema. Si se considera que una propiedad de una partícula es intrínseca si no depende de la existencia y propiedades de ninguna otra partícula, puede decirse entonces que, en mecánica bohmiana, la posición es la única propiedad intrínseca de las partículas. Del hecho de que la posición no dependa del campo cuántico se sigue, además, que la transformación del campo cuántico durante un proceso de medición de la posición, caso de ocurrir, no tiene por qué suponer una modificación de la propiedad medida. Es más, puede mostrarse que, al contrario de lo que sucede con el resto de propiedades dinámicas, una medición ideal de la posición *no* implica una modificación del valor preexistente de la propiedad medida, de modo que el valor preexistente de la posición y el valor de la misma tras la medición coinciden (cf. Bohm & Hiley, 1993, p. 109 ss.).

El singular carácter de la posición en mecánica bohmiana puede iluminarse con mayor generalidad si se considera la arquitectónica de la teoría bohmiana de la medida. A este respecto, he argumentado, en la primera sección, que la asunción fundamental de la teoría bohmiana de la medida es que el resultado de toda medición se correlaciona siempre con la *posición* de algún elemento relevante del equipo experimental, típicamente, del puntero del aparato. Se sigue de ello que puede suponerse que las funciones de onda del aparato asociadas con distintos resultados de la medición tienen soportes (aproximadamente) disjuntos en el espacio de configuración, siendo ésta, a su vez, una condición esencial para la resolución del problema de la medida y para garantizar la equivalencia empírica entre la mecánica bohmiana y el enfoque mecánico-cuántico estándar.

De la tesis posicionista de acuerdo con la cual todas las propiedades de un sistema pueden inferirse a partir de la observación de posiciones (del puntero del aparato), se sigue que, para la completitud predictiva de una teoría, basta con un algoritmo que genere predicciones acerca de la posición. En el caso de la mecánica bohmiana, este algoritmo no es otro que el postulado estadístico. Si para asegurar la adecuación empírica de la mecánica bohmiana basta con asumir que las partículas bohmianas, incluidos los punteros de los aparatos, tienen una posición siempre bien definida, cabe comprender aquellos autores que – como Bell – deciden aplicar la navaja de Ockham y deshacerse del resto de propiedades, concluyendo que la única propiedad real de los corpúsculos bohmianos es la posición. Máxime cuando la posición es, además, la única propiedad revelada con fiabilidad en un proceso de medición de la misma.

La austeridad ontológica de las interpretaciones minimalistas plantea, no obstante, ciertas dificultades en relación con su poder explicativo. Si lo único real son las posiciones, cabe preguntarse qué sentido tiene la tan ubicua charla acerca del resto de propiedades. Una posible respuesta consiste en asumir que la velocidad, el momento angular, la energía, el *spin* y, en definitiva, todas las propiedades distintas de la posición son *disposiciones* de las partículas bohmianas a ocupar determinadas posiciones en un contexto experimental específico. Dichas disposiciones se consideran completamente reducibles a la única propiedad categórica, esto es, la posición (y el campo cuántico) y, por tanto, no tienen importe ontológico. De acuerdo con esta interpretación, la ubicuidad de las referencias a propiedades disposicionales se justifica de modo pragmático por su particular utilidad en relación con la predicción (de las futuras configuraciones). Pagonis y Clifton (1995) fueron los primeros en hablar de disposiciones en mecánica bohmiana y Dorato (2006) también defiende una interpretación minimalista de la mecánica bohmiana precisamente en estos términos.

Debe destacarse, finalmente, que la divisoria interpretativa, entre aquellos que atribuyen a las partículas bohmianas toda la plétora de propiedades clásicas y aquellos que consideran que su única propiedad real es la posición, no es independiente de la divisoria entre los partidarios de los enfoques del potencial cuántico o de guía de la teoría. Nótese que, para el partidario del enfoque del potencial cuántico, la aceleración, la fuerza, la energía etc. desempeñan un papel fundamental en la provisión de una explicación causal de los fenómenos. Así pues, parece inevitable que los partidarios de dicho enfoque consideren estas propiedades como reales, suscribiendo, por tanto, una interpretación maximalista de la mecánica bohmiana. Por otro lado, en la medida en que el enfoque de guía se caracteriza por obviar cualquier recurso a las cantidades de segundo orden, dicho enfoque es claramente afín a una interpretación minimalista de la teoría, siendo un hecho, además, que muchos de los proponentes más destacados del enfoque de guía se han declarado explícitamente a favor del minimalismo.

5 Muchos mundos bohmianos

A lo largo de las secciones precedentes, he caracterizado la divisoria interpretativa entre los enfoques del potencial cuántico y de guía de la mecánica bohmiana y he explorado una pluralidad de interpretaciones en el seno de cada enfoque. Cada una de las interpretaciones exploradas está comprometida con una ontología diferente y, en este sentido, puede decirse que se corresponde con un mundo bohmiano diferente.

He investigado, en primer lugar, la cuestión de las entidades postuladas y su dimensionalidad. De acuerdo con el mundo bohmiano de Albert (1996), sólo existen la partícula universal y la función de onda y ambas habitan en el espacio de configuración, un espacio $3N$-dimensional, que resultaría ser la auténtica cancha de nuestro universo. Los mundos de Bohm e Hiley (1993) o Holland (1993) incluyen, por el contrario, dos canchas distintas para lo real: el espacio ordinario tridimensional, ocupado por N partículas, y el espacio de configuración, ocupado por la función de onda o campo cuántico. Hay también mundos bohmianos que contienen sólo una cancha tridimensional para lo real. Incluso entre estos mundos se dan diferencias sustanciales que afectan a las propiedades y simetrías de lo que hay. Así, de acuerdo con el mundo de Belousek (2003), a las partículas bohmianas hay que añadirles fuerzas (newtonianas) primitivas y una dinámica que satisface fundamentalmente el principio galileano de relatividad. Según una interpretación alternativa aquí elucidada, a las partículas bohmianas hay que añadirles "fuerzas aristotélicas" primitivas y la teoría no cuenta con la invariancia galileana entre sus simetrías fundamentales.

He investigado, también, las propiedades que cabe atribuir a las partículas bohmianas y también en este respecto las interpretaciones de la teoría difieren notablemente. Así, en los mundos de Bohm e Hiley (1993) o de Holland (1993), las partículas bohmianas están coloreadas con toda la plétora de propiedades clásicas y algunas otras genuinamente cuánticas. Si bien todas estas propiedades están bien definidas simultáneamente, se ven irreduciblemente modificadas cuando interactuamos para medirlas. El mundo de Bell (1990) es mucho más austero, pues contempla corpúsculos cuya sola propiedad es la posición, siendo ésta, además, la única propiedad que no es modificada en el transcurso de una medición de la misma.

Realistas de toda índole han impuesto muy variadas exigencias sobre lo que puede ser postulado como real. De acuerdo con uno de los requisitos más comunes, toda entidad física real debe ser tridimensional (o cuadridimensional, si se adopta una perspectiva espaciotemporal).[22] Para un realista de este tipo, la elección de interpretación

22 Para una breve historia de cómo los padres fundadores de la mecánica cuántica rechazaron la idea de una onda física en el espacio de configuración y abogaron, por tanto, por un realismo tridimensional, cf. Belousek (2003, p. 121 ss.).

en mecánica bohmiana es crucial, pues resulta evidente que no podrá aceptar mundos bohmianos como los de Bohm e Hiley (1993), Holland (1993) o Valentini (1992), pero sí los mundos bohmianos de Dürr y colaboradores (1992) o Belousek (2003).

La cuestión de la interpretación en mecánica bohmiana no sólo es relevante para aquél con preocupaciones metafísicas acerca de lo que hay, sino que también debe importar al epistemólogo inquieto por los límites de nuestro acceso a lo real. En la literatura, por ejemplo, ha sido ampliamente discutido el principio de fiabilidad de la medida, de acuerdo con el cual la medición de toda propiedad real debe de revelar fiablemente el valor preexistente de la misma (por citar sólo dos ejemplos relevantes, puede verse a este respecto la discusión de Healey, 1979, y Redhead, 1987). El partidario de este principio rechazará, sin lugar a dudas, un mundo bohmiano eminentemente participativo como el de Bohm e Hiley (1993), pero quizás se sienta más a gusto con el mundo de Bell, poblado de corpúsculos que sólo tienen posición, la única propiedad que las medidas bohmianas revelan con fiabilidad.

Cabe concluir, pues, que toda suerte de cuestiones filosóficas relevantes, que conciernen principios epistemológicos y ontológicos ampliamente discutidos en la literatura, no pueden obtener una respuesta unívoca si se mantiene una visión monolítica y simplista de la mecánica bohmiana como *una* interpretación de la teoría cuántica. Hay muchas interpretaciones de la mecánica bohmiana – muchos mundos bohmianos – y la respuesta a dichas cuestiones depende fundamentalmente de la interpretación de la mecánica bohmiana escogida. Así pues, cabe constatar que la elección de una interpretación en mecánica bohmiana es tan relevante filosóficamente como lo es en mecánica cuántica.

Agradecimientos. La investigación para realizar este artículo ha sido posible gracias al apoyo del Proyecto PERSP Consolider (CDS2009-00056) financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España y del proyecto "Propensiones y Probabilidades Cuánticas: Representación y Aplicación" (FFI2008-06418-C03-01) financiado por el mismo Ministerio.

Albert Solé

Profesor del Departamento de Filosofía,

Universidad Autónoma de Barcelona, España.

Albert.Sole@uab.cat

Abstract

Bohmian mechanics is commonly characterized as just another interpretation of quantum mechanics. In this paper I defend an alternative view, according to which Bohmian mechanics is better understood as a theory that can be interpreted in many ways. After characterizing the interpretive divide between the quantum potential approach and the guidance approach to Bohmian mechanics, I show that different interpretations of the theory correspond to radically different and often incompatible ontologies or Bohmian worlds. More concretely, I discuss the possibility of an interpretation of Bohmian mechanics that is fully compatible with a purely three-dimensional ontology and I explore the main interpretive possibilities with respect to the properties of the Bohmian particles. Finally, by contrasting the different Bohmian worlds discussed, I show that the choice of interpretation within Bohmian mechanics is as relevant as it is within quantum mechanics.

Keywords • Bohmian mechanics. Interpretation. Ontology. Realism. Three-dimensional ontology. Quantum potential approach. Guidance approach. Bohmian properties.

Referencias bibliográficas

Albert, D. Z. Elementary quantum metaphysics. In: Cushing, J. T.; Fine A. & Goldstein, S. (Ed.). *Bohmian mechanics and quantum theory: an appraisal*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996. p. 277-84. (Boston Studies in the Philosophy of Science, v. 184).

Baublitz, M. & Shimony, A. Tension in Bohm's interpretation of quantum mechanics. In: Cushing, J. T.; Fine A. & Goldstein, S. (Ed.). *Bohmian mechanics and quantum theory: an appraisal*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996. p. 251-64. (Boston Studies in the Philosophy of Science, v. 184).

Bell, J. S. Against measurement. *Physics World*, 3, p. 33-40, 1990.

Belousek, D. W. Formalism, ontology and methodology in bohmian mechanics. *Foundations of Science*, 8, 2, p. 109-72, 2003.

Bohm, D. A suggested interpretation of the quantum theory in terms of "hidden" variables I. *Physical Review,* 85, p. 166-79, 1952a.

____. A suggested interpretation of the quantum theory in terms of "hidden" variables II. *Physical Review,* 85, p. 180-93, 1952b.

____. Proof that probability density approaches $|\psi|^2$ in causal interpretation of the quantum theory. *Physical Review*, 89, p. 458-66, 1953.

Bohm, D. & Hiley, B. J. *The undivided universe: an ontological interpretation of quantum theory*. London: Routledge & Kegan Paul, 1993.

Brown, H. R et al. Bohm particles and their detection in the light of neutron interferometry. *Foundations of Physics*, 25, 2, p. 329-47, 1995.

Brown, H. R. et al. Cause and effect in the pilot-wave interpretation of quantum mechanics. In: Cushing, J. T.; Fine A. & Goldstein, S. (Ed.). *Bohmian mechanics and quantum theory: an appraisal*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996. p. 309-19. (Boston Studies in the Philosophy of Science, v. 184).

Cohen, R. S., Horne, M. & Stachel, J. (Ed.). *Experimental metaphysics: quantum mechanical studies for Abner Shimony, 1*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1997. (Boston Studies in the Philosophy of Science, v. 193).

Cohen-Tannoudji, C. et al. *Quantum mechanics*. New York: Wiley & Sons, 1977. 2v.

Cushing, J. T.; Fine A. & Goldstein, S. (Ed.). *Bohmian mechanics and quantum theory: an appraisal*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996. (Boston Studies in the Philosophy of Science, v. 184).

Dorato, M. Properties and dispositions: some metaphysical remarks on quantum ontology. *American Institute of Physics Conference Proceedings*, 844, p. 139-57, 2006.

Dürr, D. et al. Quantum equilibrium and the origin of absolute uncertainty. *Journal of Statistical Physics*, 67, p. 843–907, 1992.

____. Bohmian mechanics and the meaning of the wave function. In: Cohen, R. S., Horne, M. & Stachel, J. (Ed.). *Experimental metaphysics: quantum mechanical studies for Abner Shimony, 1*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1997. V. 193. p. 25-38. (Boston Studies in the Philosophy of Science).

Feynman, R. P. *The Feynman lectures in physics: volume 1*. Reading, MA: Addison-Wesley, 1963.

Fine, A. On the interpretation of bohmian mechanics. In: Cushing, J. T.; Fine A. & Goldstein, S. (Ed.). *Bohmian mechanics and quantum theory: an appraisal*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996. V. 184. p. 231-50. (Boston Studies in the Philosophy of Science).

Goldstein, S. Review essay: bohmian mechanics and the quantum revolution. *Synthese*, 107, p. 145-65, 1996.

Healey, R. Quantum realism: naïveté is no excuse. *Synthese*, 42, p. 121-44, 1979.

Holland, P. R. *The quantum theory of motion: an account of the De Broglie-Bohm causal interpretation of quantum mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1993.

Lewis P. J. Life in configuration space. *British Journal of Philosophy of Science*, 55, p. 713-29, 2004.

Margenau, H. Advantages and disadvantages of various interpretations of the quantum theory. *Physics Today*, 7, 10, p. 6–13, 1954.

Monton, B. Wavefunction ontology. *Synthese*, 130, p. 265-77, 2002.

____. The problem of ontology for spontaneous collapse theories. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 35, p. 407-21, 2004.

Myrvold, W. C. On some early objections to Bohm's theory. *International Studies in the Philosophy of Science*, 17, 1, p. 7-24, 2003.

Pagonis, C. & Clifton, R. Unremarkable contextualism: dispositions in the Bohm theory. *Foundations of Physics*, 25, 2, p. 281-96, 1995.

Philippidis, C. et al. Quantum interference and the quantum potential. *Il Nuovo Cimento B*, 52B, 1, p. 15-28, 1979.

Redhead, M. *Incompleteness, nonlocality, and realism*. Oxford: Clarendon, 1987.

Valentini, A. *On the pilot-wave theory of classical, quantum and subquantum physics*. Trieste, 1992. Dissertação (Doutorado). ISAS – International School for Advanced Studies.

____. Pilot-wave theory of fields, gravitation and cosmology. In: Cushing, J. T.; Fine A. & Goldstein, S. (Ed.). *Bohmian mechanics and quantum theory: an appraisal*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996. V. 184. p. 45-66. (Boston Studies in the Philosophy of Science).

____. On galilean and Lorentz invariance in pilot-wave dynamics. *Physics Letters* A, 228, p. 215-22, 1997.

Wilson, J. Newtonian forces. *British Journal for the Philosophy of Science*, 58, 173-205, 2007.