

¿POR QUÉ SE RECHAZÓ LA TEORÍA DE BOHM Y  
EN QUÉ NOS BENEFICIARÍA RETOMARLA?

Why was Bohm's theory rejected, and how would  
it benefit us to take it up again?

*Alejandro Rota*

Facultad de Filosofía y Letras,  
Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.



## I. Introducción

En 1952, David Bohm presentó dos artículos fundacionales (o refundacionales, ya que retomó y completó<sup>1</sup> la propuesta broglia de 1927, aunque sin saberlo) intitulados “Una interpretación sugerida de la Teoría Cuántica en términos de variables ocultas”, diferenciados como I y II. Propuso una interpretación causal, determinista y *ontológica*<sup>2</sup> de la mecánica cuántica<sup>3</sup> (MC a partir de ahora), a la vez que disolvía sus misterios y la desambiguaba. A pesar de todo esto, no prosperó.

Dar una respuesta definitiva sobre por qué esto fue así no es algo realizable, debido a la enorme cantidad de factores que pudieron confluír en su rechazo. No lo es, en cambio, refutar todas las críticas recibidas y enumerar los enormes beneficios de retomar su propuesta, a lo que el presente trabajo apunta.

El ensayo se desenvolverá de la siguiente manera. El apartado 2 tendrá como fin presentar las características y problemas de la MC, explicando

<sup>1</sup> Sus aportes más destacados fueron brindar una explicación del problema de la medición y probar que su propuesta era empíricamente adecuada.

<sup>2</sup> Sus aportes más destacados fueron brindar una explicación del problema de la medición y probar que su propuesta era empíricamente adecuada.

<sup>3</sup> Especificó el contenido ontológico de la MC; partículas con posiciones y postuló la ontología de la función de onda.

¿Cómo citar?: Rota, A. (2026). ¿Por qué se rechazó la teoría de Bohm y en qué nos beneficiaría retomarla? *Praxis Filosófica*, (63), e60214808. <https://doi.org/10.25100/pfilosofica.vi63.14808>

Recibido: 14 de marzo de 2025. Aprobado: 10 de agosto de 2025.

cómo estos últimos produjeron la necesidad de la creación de interpretaciones alternativas. El apartado 3 se centrará en el problema de la medición (PM), el cual explicará cómo las diversas interpretaciones intentaron resolverlo. En el mismo se presentarán, a su vez, las principales características y virtudes de la teoría defendida. El apartado 4 se encargará de reponer los factores que pudieron haber influenciado en el rechazo a la teoría bohmiana, dividiéndolos en teóricos y político-sociales. El objetivo del mismo es demostrar que ninguna crítica teórica recibida fue definitiva, lo cual se verá claro en las contraobjeciones. Acerca de los otros factores, haremos especial énfasis sobre cómo su trabajo se vio afectado por el macartismo, por el cual Bohm se convirtió en una especie de paria y pasó el resto de su vida exiliado. El apartado 5 tendrá como fin demostrar todo lo que se ganaría al retomar la propuesta original bohmiana, mostrando casos testigo de cómo su interpretación logró avances no sólo en física, sino también en otras áreas.

## **II. Los problemas de la mecánica cuántica**

La MC, como receta predictiva, resulta empíricamente adecuada y aparentemente inobjetable. El problema surge cuando se analiza la imagen que brinda de los fenómenos y procesos físicos subyacentes a las predicciones. No hay muchos antecedentes (si es que los hay) de una teoría indeterminista, acausal e invisualizable que se haya vuelto estándar.

El indeterminismo de la MC responde a la incapacidad de predecir determinísticamente resultados individuales de medición (sólo provee predicciones estadísticas de conjuntos de fenómenos), en virtud de las características de las mediciones cuánticas. Esto fue advertido por Lorentz, en el quinto Congreso de Solvay, donde la mecánica matricial (madre de la MC) imperó frente a la propuesta de la onda piloto broglia y a la mecánica ondulatoria de Schrödinger: “Quieren establecer el indeterminismo como principio. En su opinión, existen eventos que no podemos predecir mientras que, hasta ahora, siempre nos hemos permitido que estas predicciones fuesen posibles” (Bacciagaluppi y Valentini, 2009, p. 498).

La MC tiene, a su vez, una especie de indeterminismo ontológico, al aseverar que los fenómenos microscópicos son indeterminados antes de ser medidos. Y esto persiste, en ciertos casos, hasta luego de producirse los procesos de medición. En los casos regidos por las relaciones de incertidumbre<sup>4</sup>, por ejemplo, el determinar la propiedad de un sistema

---

<sup>4</sup> Denominamos de esta manera a la mecánica cuántica ortodoxa o interpretación estándar del colapso. Este vendría a ser el nombre de la teoría en su carácter formal. Su interpretación, la cual describe cómo se relaciona dicho formalismo con los objetos

físico obtura la determinación de sus otras propiedades. Y esto es tomado por Bohr (1937, p. 293) como una imposibilidad óptica, no epistémica; “El indeterminismo es inherente a la estructura misma de la materia; posición y momento no pueden siquiera existir con valores perfectamente definidos y simultáneos” (Bohm 1951, p. 100).

La MC es acausal. Según Heisenberg (1927), porque en cuántica no es posible establecer con precisión las condiciones iniciales de los fenómenos microscópicos:

según la formulación precisa de la ley de causalidad, ‘Si conocemos el presente con exactitud, podemos calcular su futuro’, no es el consecuente el erróneo, sino el antecedente. No podemos en principio conocer el presente con todos sus datos determinados. (p. 197)

Finalmente, la MC es invisualizable porque su estructura formal básica está montada sobre matrices que representan a los observables. Entonces, al operar con matrices y con la evolución de observables, no es claro (visible) sobre qué es la teoría.

Se podría objetar que dichas características son diametralmente opuestas a las de la física clásica (la cual es determinista, causal y pretende brindar una imagen objetiva del mundo), pero también podría ser, ¿por qué no?, que la naturaleza tenga en realidad características y comportamientos indeterministas y acausales. No obstante, existe cierta ambigüedad, ínsita en los genes mismos de la MC, mucho más difícil de defender, cuya necesidad de resolución llegó hasta provocar la creación de interpretaciones alternativas para subsanarlo: el PM.

La MC cuenta con dos leyes dinámicas diametralmente diferentes: la ecuación de Schrödinger (ES) y el postulado de colapso. La primera es una ecuación continua, lineal y determinista e implica que, si el estado inicial de un sistema físico está en superposición, permanece en superposición. El problema surge cuando el estado cuántico es medido, ya que los resultados experimentales arrojan resultados determinados en vez de superposiciones (en las que se consideran estar los fenómenos físicos en el paquete de ondas en el momento pre medición). De esta paradoja surge el PM, de la contradicción entre lo que la ES predice y lo que observamos. Si el estado cuántico es una descripción completa y su dinámica está sólo dada por la ES, la cual es lineal y unitaria, entonces la teoría predice que deberíamos ver superposiciones cuando medimos, cosa que no sucede. El postulado de

---

físicos, se denomina interpretación de Copenhague. Utilizaremos ambos términos en forma intercambiable.

colapso, de carácter discontinuo, no lineal y probabilístico, tiene la función de solucionar dicho problema, alegando que esto sucede porque la ES es interrumpida en el proceso de medición, momento en que la dinámica empieza a regirse por la de dicho postulado.

El postulado del colapso de la función de onda (FO) del que partiremos es el de Von Neumann (1932)<sup>5</sup>. Este autor se refiere al mismo como “proceso 1”, destacando su incompatibilidad con la evolución unitaria dictada por la ES, a la que se refiere como “proceso 2”;

la mecánica cuántica describe por medio del proceso 2 los sucesos que tienen lugar en la parte observada del mundo en tanto que no esté en interacción con la parte que observa; pero tan pronto existe una tal interacción, es decir, una medición, prescribe la aplicación del proceso 1. (Von Neumann, 2018, p. 273)

4 La explicación de por qué la evolución lineal de la ES es interrumpida y reemplazada al momento de la medición por la del postulado, según Von Neumann, radica en la interacción entre un sistema microscópico, el estado cuántico, con uno clásico y macroscópico, el aparato de medición, que provoca una alteración incontrolable del primero. El autor divide el mundo en dos niveles: el clásico y el cuántico. Entre ellos, alegaba, había un corte. Von Neumann sostenía que los sistemas microscópicos, al estar aislados, funcionaban según la dinámica cuántica de la ES, mostrando rasgos de superposición, pero que una vez interaccionasen con un sistema macroscópico estos perdían sus rasgos, adoptando características clásicas, impuestas por las leyes físicas de los aparatos de medición. Y esto ya presenta un evidente problema. Aun aceptando la plausibilidad de que sea el aparato de medición (clásico) el que dicte cómo se comporta el sistema (cuántico), una inevitable pregunta nos acecha; ¿no son acaso los aparatos de medición una colección de sistemas cuánticos? Si la respuesta es sí, entonces hay algo mal en la propuesta; si la respuesta es no, entonces desde la teoría se debería explicar qué es tan especial acerca de los aparatos de medición. Esto no resulta nada trivial; ¡la teoría es la que debe explicar qué es una interacción entre un aparato de medición y un sistema, y no al revés!

Además, esto presupone un corte, pero no especifica dónde se produce. Aunque supone que debe de haber una partición en algún lugar entre el sistema cuántico medido y el aparato de medición clásico, la línea divisoria entre uno y otro no es algo que esté determinado por la MC (por lo cual, la MC no sería una teoría fundamental, ya que precisaría de otra para que lo

---

<sup>5</sup> Cuyos observables no conmutan entre sí.

explique), sino que puede ser trazada en cualquier lugar de la cadena que va desde el sistema microscópico hasta el valor observado al final.

Además de presentar una división arbitraria, el postulado tampoco da grandes precisiones acerca de cuándo exactamente ocurre el colapso, cuánto tiempo toma, ni qué lo provoca. Un intento de dar respuesta a estos interrogantes, es adoptar la propuesta de Von Neumann y Wigner de que el colapso ocurre únicamente cuando el observador humano interviene y se apercebe del puntero medidor. Dicha solución, en vez de cumplir su función, introduce una ambigua e innecesaria subjetividad en la teoría; ¿Dónde se produce el colapso? ¿En el aparato de medición, en la retina del observador que mira el aparato, en la conciencia del observador que es consciente de la información que le transmite su cerebro...?

### III. Soluciones al problema de la medición

La resolución del PM consiste en brindar una explicación satisfactoria de por qué la superposición de estados de un fenómeno microscópico, en el que puede estar según su FO, cambia estocásticamente a un estado determinado al ser medido. El problema en sí radica en la respuesta brindada por la MC, por las siguientes razones:

1. El formalismo depende crucialmente del concepto de medición, noción que nunca se define formalmente dentro de la misma teoría.
2. Postula que el colapso sucede por la interacción entre sistemas de diversa índole: clásicos y cuánticos. Pero no especifica la línea divisoria entre uno y otro.
3. Introduce una innecesaria subjetividad a la teoría, al aseverar que el colapso sucede cuando uno percibe el resultado.

A raíz de esto, diversas interpretaciones de los fenómenos cuánticos se han propuesto para resolverlo, entre las que se destacan tres programas que siguen vigentes hasta ahora: la teoría de variables ocultas de Bohm (1952a; 1952b), muchos mundos (de Witt, 1970), y la teoría de colapsos espontáneos ([GRW] Ghirardi *et al.*, 1986).

La solución provista por muchos mundos radica, en pocas palabras, en negar tanto el colapso de la FO como la desaparición de sus estados superpuestos al producirse las mediciones. Esta interpretación sostiene que cada proceso de medición provoca que el universo se desdoble en una multiplicidad de mundos, uno por cada resultado de medición (o componente de las superposiciones);

El universo real está fielmente representado por un vector de estado similar al de la ecuación 5 pero de complejidad mucho mayor. Este universo se divide constantemente en una estupenda cantidad de ramas, todas resultantes de las interacciones tipo medición entre sus innumerables componentes. Además, cada transición cuántica que tiene lugar en cada estrella, en cada galaxia, en cada rincón remoto del universo está dividiendo nuestro mundo local en la tierra en miríadas de copias de sí mismo. (de Witt, 1970, p. 33)

Tomando al pie de la letra lo sostenido por esta interpretación, los *outcomes* no son representativos de las probabilidades de la regla de Born, lo que lleva a Maudlin (1996) a sostener que muchos mundos: “no puede ser reconciliada con la teoría cuántica tal como es usada para hacer predicciones” (p. 12).

La segunda interpretación a tratar, la teoría de colapsos espontáneos (Ghirardi *et al.*, 1986), resuelve los tres puntos del PM al sostener que el colapso es un proceso objetivo, el cual no precisa de ninguna división extraña de mundos ni ninguna noción de medición ajena a la teoría: los aparatos de medición, en ella, sólo se diferencian cuantitativamente de los fenómenos que miden.

6

GRW propone que cada partícula elemental sufre, en tiempos aleatorios distribuidos con una cierta frecuencia, procesos repentinos que la localizan (o colapsan su FO) en posiciones determinadas. La frecuencia con la que ocurren las localizaciones espontáneas es bastante pequeña<sup>6</sup>, de manera que cada partícula elemental sufre muy pocos de estos colapsos. No obstante, la frecuencia de colapsos crece con el número de partículas, lo que provoca que los fenómenos macroscópicos no puedan estar mucho tiempo en estado de superposición. En términos experimentales, cuando un fenómeno microscópico entra en un aparato de medición, la aguja entrará en una superposición de marcar, por ejemplo, 1 y 0. Sin embargo, siendo que la aguja se encuentra conformada por un número enorme de partículas, su estado colapsará en uno u otro de los componentes.

Esta propuesta, no obstante, cuenta con ciertos problemas. El mayor de entre ellos es el de los *tails*, que en pocas palabras es la aseveración de que el mecanismo de colapso gaussiano de GRW es imperfecto, por lo que no es capaz de producir estados macroscópicamente definidos (para profundizar, recomendamos tanto McQueen, 2015, como Wallace, 2022). A su vez,

---

<sup>6</sup> Debemos señalar que fue introducido antes, en 1930, por Paul Dirac, en su monumental *Principles of Quantum Mechanics*. Este libro significó el primer intento de sistematización de la mecánica cuántica. Aunque Von Neumann reconoció que difícilmente podría ser superado en brevedad y elegancia, criticó su falta de rigor matemático y en 1932 publicó su propia sistematización, que se convirtió en estándar.

GRW parecería pecar de inadecuación empírica. GRW no es empíricamente equivalente a la MC. De ser su dinámica correcta, el universo debería tener mayor temperatura que la sostenida por la MC. Estos efectos se han calculado y se ha considerado cómo se podrían verificar o refutar experimentalmente: ninguno de estos efectos, al menos hasta ahora, han sido corroborados; “Estas observaciones nulas han puesto límites sobre los valores posibles de las constantes de GRW, pero no han todavía logrado descartar esta propuesta. Experimentos más exactos podrían hacerlo” (Maudlin, 2019, p. 135).

La última interpretación a tratar, pero la primera en haberse formulado, es la propuesta de variables ocultas de Bohm. Este propuso una interpretación causal, determinista y ontológica de la MC, la cual brindaba una imagen objetiva de los fenómenos y de los procesos del mundo microscópico: partículas con posiciones siempre definidas, guiadas en forma determinista por la FO, la cual es considerada como objetivamente real.

La primera versión de la teoría de Bohm (TB) se formuló en dos artículos (1952a, 1952b), dos cartas (1952c, 1953a) y en un artículo posterior que clarificaba y defendía dicha presentación (1953b), el cual se utilizará para presentar su teoría, debido a que sirve de conciso resumen del sistema en sus inicios. A continuación, se desplegarán sus principales postulados, los cuales están organizados jerárquicamente:

...el autor ha propuesto una reinterpretación causal de la teoría cuántica, basada en las siguientes hipótesis:

- a) Un sistema mecánico cuántico, tal como un electrón, consiste básicamente de una partícula teniendo una posición precisamente definida, que varía continuamente en función del tiempo.
- b) Esta partícula es afectada no sólo por el potencial clásico  $V(\mathbf{x}, t)$  sino también por un potencial cuántico adicional  $U(\mathbf{x}, t)$ , el cual es importante a nivel atómico pero despreciable en el nivel macroscópico.
- c) Si escribimos  $\psi = R e^{\frac{iS}{\hbar}}$ , donde  $\psi$  es la función de onda y  $R$  y  $S$  son reales, entonces el potencial cuántico es dado por

$$U(\mathbf{x}, t) = - \left( \frac{\hbar^2}{2m} \right) \frac{\nabla^2 R(x,t)}{R(x,t)}$$

Entonces la ecuación de movimiento de la partícula toma la forma;

$$\frac{md^2x}{dt^2} = -\nabla\{U(x, t) + V(x, t)\}.$$

Para obtener las mismas predicciones para todos los resultados experimentales tal como son obtenidos de la interpretación usual de la teoría cuántica es necesario, sin embargo, dar los siguientes postulados especiales adicionales...: (1) El campo  $\psi$  satisface la ecuación de Schrödinger. (2) La velocidad de la partícula se restringe a  $v = \nabla S(\mathbf{x})/m$ . (3) No predecimos ni controlamos la localización precisa de una partícula, sino que tenemos un conjunto estadístico de partículas con una probabilidad de densidad,  $P(\mathbf{x}) = |\psi(\mathbf{x})|^2$  (Bohm, 1953b, pp. 458-459)

Bohm sostiene que su interpretación causal está basada en los supuestos (a), (b) y (c). Los postulados (1), (2) y (3) son importantes porque sin ellos no es posible obtener las mismas predicciones para todos los resultados experimentales de la interpretación estándar de la teoría cuántica, pero su estatus secundario relativo a (a), (b) y (c) se deduce del hecho de ser considerados por su autor como postulados “especiales”. En su primer artículo (Bohm, 1952a) los postulados (1), (2) y (3) eran casi idénticos (pero con  $\mathbf{p} = \nabla S$  en vez de  $\mathbf{v} = S/m$ ).

8

Un rasgo saliente a destacar de la interpretación propuesta es la aserción de realidad física de la FO,

Siendo que la fuerza sobre la partícula ahora depende de una función del valor absoluto,  $R(\mathbf{x})$ , de la función de onda,  $\psi(\mathbf{x})$ , sobre la posición actual de la partícula, nos hemos visto obligados a considerar a la función de onda de un electrón individual como la representación matemática de un campo objetivamente real. Este campo ejerce una fuerza sobre la partícula de una manera análoga a, pero no idéntica con, la forma en que un campo electromagnético ejerce fuerza sobre una carga, y como un campo de mesones ejerce fuerza a un núcleo. (Bohm, 1952a, p. 170)

Recapitemos un poco. La MC sostenía que el proceso de medición de un aparato macroscópico sobre un sistema microscópico individual era inherentemente impredecible, incontrolable, y no sujeto a ningún tipo de análisis o descripción ulterior. Bohm sostiene, en primer lugar, que su impredecibilidad no es inherente, sino epistémica (no podemos predecir con exactitud los resultados de medición solamente por la imposibilidad de determinar las posiciones exactas de las partículas al inicio del experimento; de lo contrario, sería posible). Sobre lo segundo acordaba, pero brindando una explicación de por qué ello sucedía, criticando así la tercera aseveración.

La MC dividía al mundo en cuántico y clásico; en cambio Bohm rompió tal dicotomía, introduciendo al aparato de medición en la teoría (como variable), en orden de poder explicarla;

Ahora, en nuestra interpretación, el sistema debe ser descrito por una cuatridimensional pero objetivamente existente onda de campo que es una función de  $x$  e  $y$ , y por un correspondiente punto representativo cuatridimensional, especificado por las coordenadas  $x$ , del electrón, y las coordenadas  $y$ , del aparato. Siendo que el movimiento del punto representativo es en parte determinado por fuerzas producidas por el campo  $\psi$  actuando tanto en el electrón como en las variables del aparato, nuestro primer paso en resolver el problema es calculando el campo  $\psi$  Esto se realiza resolviendo la ecuación de Schrödinger, con las apropiadas condiciones límite de  $\psi$ . (Bohm, 1952b, p. 181)

Bohm, a su vez, explicaba por qué se producía la transformación del sistema cuántico al ser medido, debido a la interacción del potencial cuántico, que es la fuerza que impulsa las partículas bohmianas (junto al clásico), con el aparato de medición;

Durante el transcurso de tal interacción, el potencial “mecánico cuántico” sufre fluctuaciones rápidas y violentas, que tienden a hacer vagar sobre la órbita de la partícula en toda la región en la que el campo  $\psi$  es apreciable. Además, estas fluctuaciones se complican aún más gracias a los efectos del caos molecular debido al gran número de los grados de libertad de la termodinámica interna de estos sistemas clásicos descritos, que son inevitablemente excitados en cualquier proceso de interacción. (Bohm, 1952b, p. 185)

Uno de los mayores logros atribuidos al sistema de Bohm es haber resuelto el PM. Esto es cierto, ya que resuelve los tres problemas señalados. Pero va un poco más allá, ya que explica cuál era el estado previo de las partículas antes de ser medidas. Aunque parezca increíble en el mundo cuántico, en el sistema de Bohm los procesos de medición de posiciones no crean el resultado, sino que revelan la propiedad previa de los fenómenos involucrados;

Siendo que la probabilidad de densidad es igual a  $|\psi|^2$  deducimos que la variable del aparato,  $y$ , debe entrar finalmente en uno de los paquetes y permanecer en ese paquete después de eso (siendo que no entra en el espacio intermedio entre paquetes en los cuales la probabilidad de densidad es

prácticamente cero). Ahora, el paquete que entró en la variable  $y$  del aparato determina el resultado de la medición, el cual el observador obtendrá cuando lo mire. Los otros paquetes pueden ser ignorados, porque no afectan ni al potencial mecánico cuántico sobre las coordenadas  $x$  e  $y$  de la partícula, o sobre su momento. (Bohm, 1952b, p. 182)

En la propuesta de Bohm, como se deduce de la última parte de la cita, no hay colapso, sino que los paquetes de onda que no trasladan las partículas no dejan de existir a pesar de no ser alcanzadas por la medición. No tienen la capacidad de interactuar nuevamente con la onda que guía a la partícula (por lo que no podrían modificar su dinámica en el futuro) sino sólo entre ellas. Si bien pueden resultar *ad hoc*, ya que dichas ondas en principio no pueden ser detectadas (se ha sugerido, sin embargo, que ello era posible: ver Croca, 1987), cumplen un rol explicativo en el famoso experimento de las dos rendijas.

Siendo que los demás observables (momento, velocidad, energía, spin, etc.) se definen en función de la posición, es argumentable que estos también reflejan, al menos indirectamente, el estado de los fenómenos pre-medición.

10

Otro de los logros de la interpretación de Bohm es que elimina de la teoría el rol del observador (terminando con esto de que un observador clásico colapsa el sistema cuántico meramente por interactuar con él). El proceso de medición es un proceso enteramente físico, se trata de la interacción entre sistemas, uno macroscópico (de  $10^{23}$  partículas en adelante) con uno microscópico, donde ni la conciencia ni el observador ni nada parecido desempeña ningún papel. En esa interacción se produce ese proceso, que es puramente físico y está descrito con las mismas reglas.

A pesar de todas sus virtudes explicativas, de ser empíricamente equivalente a la MC, y de haber resuelto el PM, su propuesta recibió más críticas que adhesiones. Es por esto que el objetivo del siguiente apartado radicará en fundamentar por qué su rechazo resultó, a todas luces, injusto.

## **IV. Factores que influyeron en el rechazo de la teoría de Bohm**

### *IV.1 Factores teóricos: críticas recibidas*

#### IV.1.1 Einstein

La primera objeción realizada a la interpretación propuesta por Bohm que vamos a considerar es la de Albert Einstein (1953), donde brindó un experimento mental para explicar por qué su propuesta no le resultaba satisfactoria.

En el artículo publicado para tal fin, utilizó el ejemplo de una partícula unidimensional en una caja con límites puramente elásticos, que tuviese un

potencial igual a 0 para  $(|x| > \frac{L}{2})$ , teniendo por fuera de ella los siguientes valores;

$$\psi_n(x, t) = \{C e^{-iE_n \frac{t}{\hbar}} \cos(k_n x), n \text{ impar } C e^{-iE_n \frac{t}{\hbar}} \sin(k_n x), n \text{ par}$$

Donde  $k_n = n \frac{\pi}{L}$ ,  $E_n = \hbar^2 \frac{k_n^2}{2} m$  y  $C = \frac{1}{\sqrt{L}}$ . Dentro de la caja  $\psi_n$  es, por lo tanto, una igualitaria superposición de una onda plana yendo a la derecha y de una onda plana yendo a la izquierda.

Por el postulado de las distribuciones iniciales de las partículas de Bohm, en cualquier momento  $t$  la probabilidad de densidad para la posición de dicha partícula será dada por  $|\psi_n(x, t)|^2$ . Su velocidad, sin embargo, es siempre cero. Esto es lo que Einstein encuentra cuestionable; “El desvanecimiento de la velocidad contradice el requerimiento bien fundado de que, en el caso de un sistema macroscópico, su dinámica debería coincidir aproximadamente con la de la mecánica clásica” (Einstein, 1953, p. 39).

El requerimiento de Einstein de que los sistemas macroscópicos tengan una cierta aproximación no sólo a las predicciones experimentales de la física clásica, sino a la vez a la dinámica clásica de las partículas inobservadas, es descartado por Bohm como una demanda injustificada;

En conclusión, el autor quisiera constatar que sólo admitiría dos razones válidas para descartar una teoría que explique un gran rango de fenómenos. Uno es que la teoría no sea internamente consistente, la segunda es que esté en desacuerdo con los experimentos. (Bohm, 1953c, p. 18)

De todas maneras, a pesar del contraejemplo einsteniano, la TB parecería ser la más adecuada para explicar la continuidad entre la física cuántica y la clásica. Y esto tanto desde el aspecto formal como el óntico. La mecánica newtoniana es una teoría formulada en segundo orden, al igual que la TB, por lo que resulta muy fácil derivar la primera de la última, al menos en el régimen macroscópico.

Desde el lado óntico, la TB corre con ventaja al respecto de otras interpretaciones ya que es, al igual que la mecánica newtoniana, una teoría de partículas en movimiento. La TB describe la dinámica de las partículas como una generalización de la dinámica clásica: las partículas son afectadas tanto por un potencial clásico ( $V$ ) como por uno cuántico ( $Q$ ). Cuando este último es despreciable, las partículas tendrán comportamientos clásicos. Se moverán en trayectorias newtonianas, siguiendo, por ejemplo, la segunda ley de Newton:

En la ecuación cuántica newtoniana, el potencial clásico  $V$  y el potencial cuántico  $Q$  están físicamente al mismo nivel: ambos son potencias físicas que generan fuerzas reales sobre las partículas. En esta estructura, el límite clásico puede ser tomado como el límite específico en el cual el potencial y fuerza cuántica no juegan ningún rol, mientras el potencial clásico sigue presente y sigue actuando sobre las partículas. De esta manera, la ontología de la mecánica newtoniana como una teoría de partículas en movimiento provocado por fuerzas naturalmente emerge de la teoría de Bohm de segundo orden. (Romano, 2021, p. 10607)

12 Resulta extraño que Einstein criticase una interpretación que fuese afín a su postura realista de la ciencia como la de Bohm, quien intentó brindar mediante su teoría una imagen del mundo en vez de obturarla como imposible (recordar sino la deliciosa crítica einsteniana al indeterminismo de la MC detrás de la famosa frase “Dios no juega a los dados”), así como brindar una ontología y no dejar en pie ninguna caja negra. La TB, de hecho, volvió determinista y causal a la MC, pero cometió un pecado: incrementó exponencialmente el rasgo que más preocupaba a Einstein, que es el de no-localidad<sup>7</sup> (fuerza a la que denominaba “acción misteriosa a la distancia”);

Parece como si la teoría, para él, no fuese un paso adelante en la dirección correcta ya que falló en eliminar (de hecho, en cierto sentido la exacerbó) la característica que Einstein encontraba más inaceptable en la mecánica cuántica ortodoxa: la no-localidad (Norsen, 2017, p. 206)

#### *IV.1.2 Pauli*

Pauli, cuya crítica a de Broglie en el congreso de Solvay de 1927 fue considerada como demoledora, realizó una potente crítica a la propuesta de Bohm, irónicamente presentada en el homenaje por los sesenta años de de Broglie. Pauli (1953) sostiene que Bohm introduce una asimetría injustificable entre la posición y las otras propiedades de los sistemas físicos cuánticos. Esto es también sostenido por Heisenberg, en su libro destinado a defender a la interpretación de Copenhague (1958).

En la MC, sostiene la crítica, hay una perfecta simetría entre posición y momentum, en el sentido de que la FO  $\psi(x)$  es relativa a la probabilidad de densidad de las posiciones (cuando son medidas), la cual es dada por  $|\psi(x)|^2$ , mientras la transformación de Fourier  $\psi(p)$  es relativa de una manera

<sup>7</sup> La frecuencia del colapso para una partícula singular aislada está en el orden del 10-16s-1.

similar a la probabilidad de densidad del momento (también cuando no es medido), lo cual es dado por  $|\psi(p)|^2$ . La MC sostiene que el estado cuántico se puede descomponer en infinitas bases, y todas son igualmente válidas. No hay “observable privilegiado”. Escoger un observable como privilegiado, desde la teoría, es absolutamente injustificado.

La interpretación de Bohm, al darle estatus ontológico a las posiciones, es acusada de romper esa simetría, por lo cual los autores sostienen que debe ser rechazada, así sólo sea por cuestiones estéticas; “[La propuesta de Bohm] Introduce una asimetría con respecto a la interpretación de magnitudes conjugadas canónicas para la cual uno no encuentra justificación ni en el régimen de nuestras experiencias ni el formalismo matemático de la mecánica de ondas” (Pauli, 1953, p. 39).

Tampoco es que, cabe destacar, del formalismo matemático se desprenda naturalmente la simetría de los fenómenos, tal como bien resalta Myrvold (2003);

¿Indica una simetría física el hecho de que las ecuaciones hamiltonianas de movimiento retengan su forma bajo las transformaciones canónicas (26)?

La respuesta, creo, es no. Las ecuaciones hamiltonianas de movimiento retienen su forma bajo transformaciones canónicas *arbitrarias*, sin importar la forma que el hamiltoniano tome. El hecho de que las ecuaciones hamiltonianas de movimiento retengan su forma bajo las transformaciones canónicas (26), por lo tanto, no brinda ninguna información acerca de las simetrías de un sistema. (p. 18)

El argumento de Pauli parecería sugerir que las partículas tienen posiciones y momentos aun cuando no los midamos. Pero esto no es lo que la MC sostiene, estando su énfasis únicamente puesto en los *outcomes*. La MC no sostiene que las partículas tienen posiciones y momentos distribuidos acorde a  $|\psi(x)|^2$  y  $|\psi(p)|^2$ ; únicamente dice que se encontrarán esas distribuciones como resultados de las mediciones.

Además, no es ociosa la ruptura de esta supuesta simetría, si es que eso conlleva a brindar una imagen coherente de los fenómenos, tal como la TB hace. Y posición parece ser una “base privilegiada”, ya que en general siempre observamos posiciones. De hecho, de ellas es posible derivar los otros valores, tal como sostienen los bohmianos:

Observando la posición en el tiempo  $t$  uno puede deducir el (aproximado) valor del momento. Bohm demostró que todas las mediciones cuánticas siguen este patrón, al final la posición es lo que se mide y la interacción de

medición está diseñada para introducir una correlación entre el valor medido y el estado del puntero del aparato de medición (posición). (Dewdney, 2023, p. 10)

### 4.1.3 Heisenberg

Heisenberg formula tres críticas. En la primera de ellas acusa a la TB de ser, en cierta medida, parasitaria. Sostiene que no es rival de la MC, sino su exacta repetición en diferente lenguaje: “Desde un punto de vista estrictamente positivista, hasta podemos decir que aquí no nos encontramos con contraproposiciones a la interpretación de Copenhague sino con su exacta repetición en un lenguaje diferente” (Heisenberg, 1958, p. 130). El autor se basa en la postura empirista que sostiene que dos teorías empíricamente equivalentes (es decir, que cuentan con las mismas consecuencias observacionales) no son más que dos formulaciones alternas de la misma teoría.

14 Desde una postura instrumentalista de la ciencia, donde el poder explicativo carece de valor, esto parecería cierto. No obstante, siendo que metafísicamente son dos teorías diametralmente distintas, que brindan imágenes diametralmente opuestas del mundo, esto no es algo que pueda ser sostenido desde una óptica realista. Más siendo que la TB logra resolver y explicar problemas difíciles (por no decir imposibles) de tratar desde la MC, tales como los cristales de tiempo, el efecto Aharonov-Bohm, las fases geométricas, el experimento de las dos rendijas y el problema del tiempo de los túneles cuánticos, por nombrar sólo unos pocos.

La segunda crítica heisenbergiana sostiene que la FO, a diferencia de lo sostenido por Bohm, no puede ser considerada como real siendo que, de existir, debería habitar el espacio de configuración, el cual toma como un mero artefacto matemático: “La palabra “real” se relaciona con la palabra latina “res”, que significa “cosa”; pero las cosas están en el ordinario espacio tridimensional, no en un abstracto espacio de configuración” (Heisenberg, 1958, p. 130). Esta crítica es compartida también por de Broglie (1930), quien abandonó su interpretación por no poder conferir realidad física a la FO (p. 120). Bohm mismo llegó a aseverar, por el mismo prejuicio, que la FO no era más que una herramienta informacional del movimiento de las partículas (Bohm y Hiley, 1993). Idea en base a la que se construyó la mecánica bohmiana (Dürr *et al.*, 1996), la cual concibió a la FO como una entidad de tipo nomológica.

No obstante, la discusión acerca de la ontología del espacio de configuración y de la FO aún no ha sido zanjada, siendo el realismo de la función de onda (Albert, 1996; Lewis, 2004; Loewer, 1996; Ney, 2021; North, 2013) su mayor defensor. Esta propuesta postula la onticidad de la FO y del espacio de configuración, al que toma como el espacio fundamental, sosteniendo el carácter derivado del espacio físico y los fenómenos tridimensionales. Sin contar con la interpretación de multi-campos (Belot, 2012; Hubert y Romano, 2018; Romano, 2021), la cual postula a la FO como un nuevo tipo de campo tridimensional capaz de influenciar la evolución de las partículas desde su mismo espacio físico.

La tercera, en la que acusa a la postulación de posiciones y trayectorias de las partículas de meras “superestructuras ideológicas”, es sólo el preludeo de un argumento más complejo, pero ineficaz. Heisenberg sostiene que las propiedades y trayectorias de los fenómenos son incontrastables, por lo cual los trata de superfluos. A esto, agrega que Bohm sostiene que pueden ser contrastados, cambiando ciertas características formales de la MC. De esta manera, los parámetros (ya no tan) ocultos podrían generar predicciones nuevas, que al ser divergentes de las de la MC podrían llevar a su refutación: “Bohm expresa la esperanza de que en futuros experimentos en el rango de partículas elementales los parámetros ocultos puedan jugar un rol físico, por lo que la teoría cuántica pueda ser demostrada falsa.” (Heisenberg, 1958, p. 132).

Esta crítica parece un poco incoherente con la primera, donde trata a la TB como parasitaria por no brindar predicciones nuevas. Estas últimas, explica Bohm, pueden obtenerse de realizarse ciertos cambios en los postulados especiales adicionales: 1) Que  $\psi$  ya no satisfaga la ecuación de Schrödinger, sino a una versión suya no-lineal e inhomogénea, 2) Eliminar la restricción de velocidad de las partículas a  $v = \nabla S(x)/m$ , y 3) Que las condiciones iniciales de los sistemas físicos no sean representadas por un conjunto estadístico de partículas con una probabilidad de densidad  $P(x) = |\psi(x)|^2$ . Este último, denominado en la actualidad como el postulado del equilibrio cuántico, se deriva del abandono de las dos primeras.

Bohm sostiene que estas modificaciones pueden resultar importantes para desentrañar el significado del mundo subatómico, para poder hacer predicciones acerca de fenómenos asociados a distancias del orden de  $10^{-13}$  o menos (Bohm, 1952a, p. 179). El autor asevera, además, que estos cambios serían inapreciables en el nivel cuántico, y hasta podrían permitir predicciones simultáneas de posición y momento. Heisenberg (1958) trata de ridículas estas hipótesis:

Cuando se expresaban tan curiosas esperanzas, Bohr acostumbraba decir que eran de estructura similar a la afirmación: “Podemos esperar que algún día resulte que  $2 \times 2 = 5$ , porque esto sería de gran beneficio para nuestras finanzas.”... no sería fundamentalmente inimaginable, por ejemplo, que una futura extensión de la lógica matemática pudiera dar un cierto significado a la afirmación de que en casos excepcionales  $2 \times 2 = 5$ , y hasta puede ser posible que esa extensión de las matemáticas fuera útil para los cálculos en los planos de la economía. A pesar de todo, estamos realmente convencidos, sin fundamentos lógicos convincentes, de que en las matemáticas tales cambios no servirían para ayudarnos financieramente. Por consiguiente, es muy difícil comprender cómo las propuestas matemáticas señaladas en el trabajo de Bohm, como una posible realización de sus esperanzas, puedan ser utilizadas para la descripción de fenómenos físicos. (p. 132)

16

En primer lugar, estar convencido de algo no es un argumento. Como mucho, sería un argumento *ad verecundiam*. Su “conclusión”, que las propuestas matemáticas de Bohm son inútiles, por esto mismo, no tiene lógica. En segundo lugar, unas líneas por debajo, Heisenberg parecería contradecirse al referirse a lo propuesto por Bohm no como algo ilógico, incoherente, sino como “(una) posible alteración de la teoría cuántica”.

Es una pena que Bohm no haya explorado con determinación su propuesta para desentrañar el mundo subatómico (aún inexplorado), pero mostrar que las críticas que frustraron sus intenciones no son de ninguna manera definitivas quizás logre que alguien a futuro lo haga. En lo que resta del apartado, se desplegarán las razones político-sociales que jugaron un rol tanto en el rechazo de la propuesta de Bohm como a su persona.

## IV.2 Factores político-sociales: “Bohm el rojo”

Un importante factor que condicionó la posibilidad de una buena recepción de la interpretación de Bohm fue netamente político. Fue una víctima de la cruzada anti-comunista del senador Joe McCarthy, lo que derivó en un rechazo a priori de todo lo que propusiese; “Las reacciones a la teoría estaban basadas menos en cuestiones científicas que en las acusaciones a Bohm de ser un *fellow traveler*, un trotskista y un traidor.” (Peat, 1997, p. 133).

Bohm fue miembro del Partido Comunista Americano durante unos meses entre 1942 y 1943, en los tiempos en que Estados Unidos y la Unión Soviética eran aliados. Su pertenencia fue corta, ya que encontraba los comités aburridos, empero siempre siguió interesado en la filosofía marxista y el hegelianismo, en particular la dialéctica. En particular, esto último impulsó su visión holística de la MC (en la que insistió hasta en sus

últimos trabajos), ya que los fenómenos de no-localidad y de entrelazamiento cuántico eran afines a tal idea.

En mayo de 1949 fue llamado por el “Comité de la Cámara sobre Actividades Antiamericanas” en orden de testificar en contra de algunos antiguos colegas que eran sospechados de espionaje soviético. Se rehusó (aconsejado por Einstein) invocando la cláusula que protege a los ciudadanos contra la autoinculpación en la “Quinta Enmienda” de la constitución estadounidense. Por esta acción fue imputado en 1950 bajo el cargo de “desacato al congreso”. Al enterarse de los cargos atribuidos, la Universidad de Princeton, donde trabajaba, lo suspendió, con goce de sueldo, de sus labores docentes y le prohibió poner siquiera un pie en el campus.

Bohm fue absuelto en mayo de 1951, no obstante, la universidad rehusó renovar el contrato. A raíz de esto no pudo conseguir trabajo en ninguna otra universidad de su país. Resignado, emigró a Brasil, donde aceptó un cargo en la Universidad de San Pablo. Como efecto de esto fue privado de su pasaporte estadounidense, el cual sólo le sería devuelto en caso de volver a su país, por lo que tuvo que obtener la ciudadanía brasileña en orden de poder viajar, lo que le permitió mudarse y aceptar un cargo en 1955 en el Instituto Tecnológico de Israel, para luego hacer lo mismo en 1957 en la Universidad Londinense de Birbeck, donde obtuvo el puesto de Profesor de Física Teórica y ejerció hasta el final de sus días<sup>8</sup>.

Clauser (2002) sugiere que el trabajo de Bohm no sólo sufrió las consecuencias del macartismo, sino las de haber osado presentar una alternativa a la MC, cuestionando de esa manera sus fundamentos;

Un estigma secundario muy poderoso comenzó a desarrollarse dentro de la comunidad física hacia cualquiera que sacrílegamente fuera crítico de los fundamentos de la teoría cuántica. El estigma sobrevivió durante mucho tiempo a la era McCarthy y persistió hasta bien entradas las décadas de 1970 y 1980... El impacto neto de este estigma fue que cualquier físico que criticara abiertamente o incluso cuestionara seriamente esos fundamentos (o predicciones) fuera inmediatamente tildado de “charlatán”. Naturalmente, a los charlatanes les resultaba difícil encontrar trabajos decentes dentro de su profesión. (p. 72)

---

<sup>8</sup> La TB es manifiestamente no-local, en el sentido de que la velocidad de cada partícula, en cada instante, depende de la simultánea posición de todas las otras partículas (al menos cuando hay entrelazamiento). La no-localidad es resistida en la comunidad científica porque parecería ser inconsistente con la relatividad especial. No obstante, es un fenómeno hartamente corroborado, cuyo único debate actual es acerca de su interpretación.

## V. Beneficios de retomar la propuesta original bohmiana

En primer lugar, se debe aclarar por qué el apartado se propuso rescatar la propuesta original de Bohm. Esto se debe a que 1996 dio inicio a una nueva vertiente, denominada mecánica bohmiana (Dürr *et al.*, 1996), cuyas características más salientes fueron haber reformulado la teoría en primer orden (al igual que la propuesta original brogliana) y descartado tanto al potencial cuántico como la ontología de la FO. Esta decisión, amparada estratégicamente en resolver la problemática causación de una entidad residente del espacio de configuración (la FO) sobre entidades de otro espacio (el espacio físico, tri o cuatridimensional), generó ciertas adherencias y es, argumentablemente, la teoría estándar dentro del marco bohmiano. No obstante, si bien este programa de investigación es muy fructífero, le restó cierto poder causal a la propuesta original de Bohm (en la mecánica bohmiana la FO no influencia causalmente a las partículas, sino que prescribe su evolución nomológicamente). Es por esto que, en base a su mayor poder explicativo, nos propusimos argumentar sobre la importancia de retomar el trabajo original de Bohm. Para esto, desplegaremos algunas de sus aplicaciones exitosas sobre problemas que parecían a priori irresolubles. El listado no es exhaustivo (por cuestiones de brevedad), pero brinda un significativo ejemplo de los avances logrados (y posibles) desde el marco teórico bohmiano.

18

### V.1 Efecto Aharonov-Bohm

Este efecto sucede cuando una línea de flujo magnético produce modificaciones observables en un patrón de interferencia de electrones, aunque los propios electrones se encuentren alejados de campos magnéticos. Este fenómeno fue primeramente postulado por Ehrenberg y Siday (1949), y analizado en profundidad por Aharonov y Bohm (1959), quienes lo explicaron y propusieron una forma de contrastarlo, lo cual derivó en su descubrimiento. La MC brinda al respecto una explicación meramente dinámica del efecto, condicionada a que sucede cuando el hamiltoniano cuántico toma determinada forma. Aharonov y Bohm brindan dos explicaciones: o las partículas son influenciadas por potencias independientes de los campos magnéticos<sup>9</sup> (llegando a afirmar, incluso, que las primeras deberían ser tomadas como fundamentales en la MC, siendo que los segundos pueden ser derivados de ellas), o los campos son capaces de influenciar

---

<sup>9</sup> Para una descripción más pormenorizada del exilio forzado de Bohm, recomendamos Freire, 2019.

no-localmente a las partículas. Esta discusión aún prosigue. No obstante, el efecto Aharonov-Bohm ha tenido múltiples aplicaciones. Por mencionar sólo dos, jugó un rol esencial en el descubrimiento de los cristales de tiempo (Zeng *et al.*, 2017, p.1) y de las fases geométricas (Cohen *et al.*, 2019, p. 437).

## V.2 Átomos ultra-fríos

Los átomos ultra-fríos son aquellos átomos cuya temperatura suele estar por debajo de algunas décimas de microkelvin, tal que sus propiedades mecánico-cuánticas se vuelven relevantes, por lo que su dinámica es gobernada por la ES. Las trayectorias bohmianas han sido utilizadas para investigar el transporte adiabático de un átomo singular entre las trampas más externas de un sistema formado por tres trampas idénticas. Esto ha permitido obtener un mayor entendimiento del transporte adiabático de átomos singulares, condensaciones tipo Bose-Einstein y de agujeros en potenciales de pozos triples (Benseny *et al.*, 2014, p. 6).

## V.3 Túnel cuántico

El efecto túnel cuántico es un fenómeno en el que una partícula puede atravesar una barrera de energía potencial que, según la mecánica clásica, no debería ser posible. La transmisión a través de la barrera de potencial puede ser finita y depende exponencialmente del ancho y la altura de la barrera. El problema de este fenómeno consiste en determinar cuánto tiempo les toma a las partículas hacer un túnel en las barreras. Esto es particularmente difícil de tratar desde la MC, ya que el tiempo en ella no puede ser representado por un operador autoadjunto<sup>10</sup>. Esto es parcialmente resuelto mediante la aplicación de relojes cuánticos y operadores de tiempo. Empero, no hay acuerdo sobre la estructura capaz de resolver este problema, destacándose entre ellas la de fase del tiempo, el tiempo del reloj de Larmor y el reloj de tiempo de Salecker-Wigner-Peres: “Los autores abordan las diversas expresiones candidatas de diferentes maneras, por diferentes razones; como mínimo, la situación es de confusión y ambigüedad.” (Field, 2022, p. 9).

Desde la TB estas dificultades no aparecen, ya que provee una clara y unívoca respuesta, con su respectiva ecuación de predicción, que resulta hasta trivial (Field, 2022, p. 12). Dada una FO  $\psi(x; t)$ , el tiempo del túnel es sencillamente definido como el tiempo promedio en que las trayectorias

---

<sup>10</sup> Esto es controversial dado que, al no ser los potenciales *gauge* invariantes, no se considera que puedan tener significado físico independientemente de los campos.

bohmanas pasan las barreras. Cushing (1995) sostuvo que, dado que el tiempo del túnel se encuentra bien definido en la TB, a diferencia de la MC, su contrastación podría llevar a una confirmación de su mayor adecuación empírica. Esto es sumamente problemático, siendo que al ser dos teorías que realizan las mismas predicciones, la verificación o refutación experimental afectaría de igual manera a ambas. De todas maneras, si tomamos como un valor epistémico la explicación pormenorizada de un fenómeno, la TB claramente aventaja a la MC en la interpretación y predicción del tiempo del túnel cuántico.

#### V.4 Interacciones de luz-materia intensas

La TB se ha utilizado en un amplio rango de situaciones en el área de interacciones de luz-materia fuertes. Tal es así, que nos deberemos limitar a una sola de sus aplicaciones: cómo las trayectorias bohmanas han sido empleadas para explicar cómo los electrones absorben el momento angular debido a la polarización de la luz y a su momento angular orbital.

20 La luz transporta  $s\hbar$  momento angular por fotón debido a su polarización, pero también puede transportar momento angular orbital debido a su perfil transversal. Por ejemplo, los haces Laguerre-Gaussianos tienen un ángulo dependiente de fase azimutal  $\exp(il\phi)$  que les dota de un momento angular de  $l\hbar$  por fotón. La interacción de los haces con un átomo tiene reglas de selección particulares que permiten una transferencia de momento angular al estado electrónico de más de  $\hbar$  por fotón. Gracias al perfil espacial de la luz, no es posible reducir la dimensionalidad del sistema, por lo que se debe integrar la ES en tres dimensiones para diferentes polarizaciones, posiciones relativas entre el átomo y el pulso, y la longitud del pulso. En el caso en que el giro y momento orbital y angular de la luz incidente apuntan en la misma dirección, las trayectorias bohmanas asociadas al electrón giran alrededor del vórtice de luz mientras la posición media del electrón permanece en reposo en el origen (Benseny *et al.*, 2014, p. 9). Este intercambio da como resultado una mayor ionización y una gran transferencia de momento angular al electrón. Esta descripción de cómo los electrones absorben el momento angular debido a la polarización de la luz y a su momento angular orbital es algo que la MC no puede hacer, así como su respectiva predicción.

#### VI. Comentarios finales

Las críticas que pudieron haber ejercido un rol preponderante en el rechazo a la TB no fueron ni definitivas, ni graves, ni significativas. La mayoría

fueron de carácter estético y todas, como se vió, fueron resueltas. Resulta extraño que hasta los 90 casi nadie haya comprendido la importancia de las soluciones bohmianas brindadas a todas las ambigüedades y desperfectos explicativos de la MC. Muchos factores pudieron haber confluído en el rechazo a la TB, pero quizás los más importantes no tengan que ver con valores teóricos, sino con el dogmatismo imperante sobre la fundamentalidad de la MC, así como la persecución y proscripción de su creador por sus creencias éticas y políticas.

No se puede dar una respuesta definitiva a una pregunta que es fundamentalmente histórica; sí se puede, en cambio, analizar los argumentos y factores que pudieron ejercer un rol en su rechazo, en orden de señalar el injusto trato al que la teoría fue sujeto. Y en ese devenir histórico se vio perjudicada la física: los defensores de la TB, en absoluta minoría, lograron notables avances desde principios de los 90; ¿Qué hubiese pasado si la teoría se hubiese desarrollado a mediados de siglo? ¿Cuántos progresos y descubrimientos se hubiesen adelantado?

Es por eso que se eligieron algunos casos testigos de los avances en comprensión y predicción logrados por la teoría bohmiana. Y pusimos sólo algunos sencillamente porque son casi inabarcables. Tuvimos que dejar afuera, por dar un solo ejemplo, el rol fundamental de la teoría en el descubrimiento del fenómeno de no-localidad (Bell (1964), por ejemplo, creó su famoso teorema para probar la característica más resistida de la teoría bohmiana<sup>11</sup> (Bricmont, 2016, p. 184)). Y este descubrimiento provocó una revolución en la teoría de la información, la cual promovió la creación de disciplinas tales como la computación, la teletransportación y la criptografía cuánticas. Revolución que hasta produjo nuevas y más eficientes técnicas de detección de enfermedades. De hecho, el Premio Nobel 2022 en física fue otorgado a Aspect, Clauser y Zeilinger, por considerarlos pioneros del campo de la información cuántica, en honor a los experimentos tipo Bell que realizaron.

De retomarse seriamente esta teoría, además de resolverse una injusticia histórica, se podría avanzar en muchos proyectos que serían muy beneficiosos para la comprensión y predicción del mundo microscópico. El mundo subatómico, como se ha visto en el subapartado 4.1.3, podría ser desentrañado. Y esto, según Nikolíc (2022, p. 16), podría probar que la mecánica cuántica no-relativista es más fundamental que la teoría cuántica de campos. En ese artículo, de hecho, propuso un modelo de una teoría bohmiana de campos, empresa que de ser extendida podría resolver

<sup>11</sup> Es decir, no es un observable, sino un parámetro.

los problemas de la teoría, como la carencia de una ontología clara o su aparente incompatibilidad con el fenómeno de gravitación<sup>12</sup>. Este último, a su vez, es otro claro ejemplo de lo fructífero del marco bohmiano, ya que existen varias propuestas de extenderlo a la gravedad cuántica canónica (Shtanov, 1996; Vink, 1992) capaces de resolver sus mayores problemas (el de la medición y el del tiempo). Estas propuestas, de hecho, generaron nuevas aplicaciones y predicciones en cosmología cuántica. Estos incluyen la resolución de singularidades espacio-temporales, nuevos tipos de aproximaciones semiclásicas a la gravedad cuántica y aproximaciones a las perturbaciones cuánticas que se mueven en un fondo cuántico (Pinto-Neto y Struyve, 2019, p. 38).

Esperamos, sinceramente, que este ensayo sirva para promover la adopción de la TB como un programa de investigación relevante. Hay mucho trabajo todavía por hacer, muchas aplicaciones y muchos fenómenos a desentrañar, y creemos que la propuesta de Bohm es una herramienta adecuada para realizarlo.

## Referencias bibliográficas

- Aharonov, Y. y Bohm, D. (1957). Discussion of Experimental Proof for the Paradox of Einstein, Rosen, and Podolsky. *Physical Review*, 108(4), 1070–1076. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.108.1070>
- Aharonov, Y. y Bohm, D. (1959). Significance of Electromagnetic Potentials in Quantum Theory. *Physical Review*, 115(3), 485-491. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.115.485>
- Albert, D. (1996). Elementary Quantum Metaphysics. En J. Cushing, A. Fine y S. Goldstein (Eds.), *Bohmian Mechanics and Quantum Theory: An Appraisal* (1° Ed., V. 184, pp. 277-284). Kluwer Academic Publishers. [https://doi.org/10.1007/978-94-015-8715-0\\_19](https://doi.org/10.1007/978-94-015-8715-0_19)
- Bacciagaluppi, G. y Valentini, A. (2009). *Quantum Theory at the Crossroads: Reconsidering the 1927 Solvay Conference*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139194983>
- Bell, J. (1964). On the Einstein Podolsky Rosen paradox. *Physics Physique Fizika*, 1(3), 195–200. <https://doi.org/10.1103/PhysicsPhysiqueFizika.1.195>
- Belot, G. (2012). Quantum states for primitive ontologists. *European Journal for Philosophy of Science*, 2(1), 67–83. <https://doi.org/10.1007/s13194-011-0024-8>
- Benseny, A., Albareda, G., Sanz, A. S., Mompert, J y Oriols, X. (2014). Applied Bohmian mechanics. *The European Physical Journal D*, 68(286), 1-42. <https://doi.org/10.1140/epjd/e2014-50222-4>
- Bohm, D. (1951). *Quantum Theory*. Prentice-Hall.

<sup>12</sup> Sin contar, además, que para crear su teorema empleó la reformulación del experimento EPR propuesta por Aharonov y Bohm (1957).

- Bohm, D. (1952a). A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of 'Hidden' Variables. I. *Physical Review*, 85(2), 166-179. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.85.166>
- Bohm, D. (1952b). A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of 'Hidden' Variables. II. *Physical Review*, 85(2), 180-193. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.85.180>
- Bohm, D. (1952c). Reply to a Criticism of a Causal Re-Interpretation of the Quantum Theory. *Physical Review*, 87(2), 389-390. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.87.389.2>
- Bohm, D. (1953a). Comments on a Letter Concerning the Causal Interpretation of the Quantum Theory. *Physical Review*, 89(1), 319-320. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.89.319.2>
- Bohm, D. (1953b). Proof That Probability Density Approaches  $|\psi|^2$  in Causal Interpretation of the Quantum Theory. *Physical Review*, 89(2), 458-466. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.89.458>
- Bohm, D. (1953c). A discussion of certain remarks by Einstein on Born's probability interpretation of the  $\psi$ -function. En E. Appleton (Ed.), *Scientific Papers Presented to Max Born* (1° Ed., Vol. 119, pp. 13-19). Hafner.
- Bohm, D. y Hiley, B. J. (1993). *The Undivided Universe: An Ontological Interpretation of Quantum Theory*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203980385>
- Bohr, N. (1937). Causality and Complementarity. *Philosophy of Science*, 4(3), 289-298. <https://doi.org/10.1086/286465>
- Bricmont, J. (2016). *Making Sense of Quantum Mechanics*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-25889-8>
- Clauser, J. F. (2002). Early History of Bell's Theorem. En R. A. Bertlmann y A. Zeilinger (Eds.), *Quantum [Un]speakables: From Bell to Quantum Information* (1° ed., pp. 61-96). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-05032-3\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-662-05032-3_6)
- Cohen, E., Larocque, H., Bouchard, F., Nejadstari, F., Gefen, Y. y Karimi, E. (2019). Geometric phase from Aharonov-Bohm to Pancharatnam-Berry and beyond. *Nature Reviews Physics*, (1), 437-449. <https://doi.org/10.1038/s42254-019-0071-1>
- Croca, J. R. (1987). An experiment for detection of empty waves. *Physics Letters A*, 124(1-2), 22-26. [https://doi.org/10.1016/0375-9601\(87\)90364-1](https://doi.org/10.1016/0375-9601(87)90364-1)
- Cushing, J. T. (1995). Quantum tunneling times: A crucial test for the causal program? *Foundations of Physics*, 25, 269-280. <https://doi.org/10.1007/BF02055207>
- de Broglie, L. (1927). La mécanique ondulatoire et la structure atomique de la matière et du rayonnement. *Le journal de Physique et le Radium*, 8(5), 225-241. <https://doi.org/10.1051/jphysrad:0192700805022500>
- de Broglie, L. (1930). *An Introduction to the Study of Wave Mechanics*. Methuen And Co.
- De Witt, B. M. S. (1970). Quantum Mechanics and Reality. *Physics Today*, 23(9), 30-35. <http://dx.doi.org/10.1063/1.3022331>

- Dewdney, C. (2023). Rekindling of de Broglie–Bohm Pilot Wave Theory in the Late Twentieth Century: A Personal Account. *Foundations of Physics*, 53, 24. <https://doi.org/10.1007/s10701-022-00655-w>
- Dirac, P. (1930). *The Principles of Quantum Mechanics*. Clarendon Press.
- Dürr, D., Goldstein, S. y Zanghì, N. (1996). Bohmian Mechanics as the Foundation of Quantum Mechanics. En J. Cushing, A. Fine y S. Goldstein (Eds.), *Bohmian Mechanics and Quantum Theory: An Appraisal* (pp. 21–45). Kluwer Academic Publishers. [https://doi.org/10.1007/978-94-015-8715-0\\_2](https://doi.org/10.1007/978-94-015-8715-0_2)
- Ehrenberg, W. y Siday, R. (1949). The Refractive Index in Electron Optics and the Principles of Dynamics. *Proceedings of the Physical Society. Section B*, 62(1), 8–21. <https://doi.org/10.1088/0370-1301/62/1/303>
- Einstein, A. (1953). Elementare Überlegungen zur Interpretation der Grundlagen der Quantenmechanik. En E. Appleton (Ed.), *Scientific Papers Presented to Max Born* (1° Ed., Vol. 119, pp. 33–40). Hafner.
- Field, G. E. (2022). On the status of quantum tunnelling time. *European Journal for Philosophy of Science*, 12, 57. <https://doi.org/10.1007/s13194-022-00483-9>
- Freire, O. (2019). *David Bohm, A Life Dedicated to Understanding the Quantum World*. Springer Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-22715-9>
- Ghirardi, G. C., Rimini, A. y Weber, T. (1986). Unified Dynamics for Microscopic and Macroscopic Systems. *Physical Review D*, 34(2), 470–491. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.34.470>
- Heisenberg, W. (1958). *Physics and Philosophy*. Harper & Brothers Publishers.
- Heisenberg, W. (1927). Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik. *Zeitschrift für Physik*, 43, 172–198. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0122.197708h.0651>
- Hubert, M. y Romano, D. (2018). The wave-function as a multi-field. *European Journal for Philosophy of Science*, 8(3), 521–537. <https://doi.org/10.1007/s13194-017-0198-9>
- Lewis, P. (2004). Life in configuration space. *British Journal for the Philosophy of Science*, 55(4), 713–729. <https://doi.org/10.1093/bjps/55.4.713>
- Loewer, B. (1996). Humean supervenience. *Philosophical Topics*, 24(1), 101–127. <https://doi.org/10.5840/philtopics199624112>
- Maudlin, T. (1996). Three measurement problems. *Topoi*, 14, 7–15. <https://doi.org/10.1007/BF00763473>
- Maudlin, T. (2019). *Philosophy of physics: Quantum Theory*. Princeton University Press. <http://dx.doi.org/10.1515/9780691190679>
- McQueen, K. (2015). Four tails problems for dynamical collapse theories. *Studies in the History and Philosophy of Modern Physics*, 49, 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2014.12.001>
- Myrvold, W. C. (2003). On some early objections to Bohm’s theory. *International Studies in the Philosophy of Science*, 17(1), 7–24. <https://doi.org/10.1080/02698590305233>
- Ney, A. (2021). *The world in the Wave Function: A Metaphysics for Quantum Physics*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oso/9780190097714.001.0001>

- Nikolić, H. (2022). Relativistic QFT from a Bohmian Perspective: A Proof of Concept. *Foundations of Physics*, 52, 80. <https://doi.org/10.1007/s10701-022-00600-x>
- Norsen, T. (2017). *Foundations of quantum mechanics: an exploration of the physical meaning of quantum theory*. Springer International Publishing.
- North, J. (2013). The structure of a quantum world. En D. Albert y A. Ney (Eds.), *The Wave Function: Essays in the Metaphysics of Quantum Mechanics* (1° Ed, pp. 184–202). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199790807.003.0009>
- Pauli, W. (1953). Remarques sur le problème des paramètres cachés dans la mécanique quantique et sur la théorie de l'onde pilote. En A. George (Ed.), *Louis de Broglie: Physicien et Penseur*; (1° ed., pp. 33–42). Éditions Albin Michel.
- Peat, D. (1997). *Infinite Potential: The Life and Times of David Bohm*. Basic Books.
- Pinto-Neto, N. y Struyve, W. (2019). Bohmian Quantum Gravity and Cosmology. En X. Oriols y J. Mompart (Eds.), *Applied Bohmian Mechanics, From Nanoscale Systems to Cosmology* (2° ed., pp. 607–665). Jenny Stanford Publishing. <https://doi.org/10.1201/9780429294747-11>
- Romano, D. (2021). Multi-field and Bohm's theory. *Synthese*, 198(11), 10587–10609. <https://doi.org/10.1007/s11229-020-02737-6>
- Shtanov, Y. V. (1996). Pilot wave quantum cosmology. *Physical Review D*, 54, 2564–2570. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.54.2564>
- Vink, J. C. (1992). Quantum potential interpretation of the wave function of the universe. *Nuclear Physics B*, 369(3), 707–728. [https://doi.org/10.1016/0550-3213\(92\)90283-H](https://doi.org/10.1016/0550-3213(92)90283-H)
- von Neumann, J. (1932). *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*. Springer.
- von Neumann, J. (2018). *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*. Princeton University Press. <https://doi.org/10.2307/j.ctt1wq8zhp>
- Wallace, D. (2022). Life and Death in the Tails of the GRW Wave Function. *International journal of quantum foundation*, 8(3), 148–157.
- Zeng, L., Xu, J., Wang, C., Zhang, J., Zhao, Y., Zeng, J. y Song, R. (2017). Photonic time crystals. *Scientific Reports*, 7, 17165. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-17354-6>