

EL “REALISMO HEURÍSTICO” Y SU ROL EN LA SEGUNDA REVOLUCIÓN CUÁNTICA

“Heuristic Realism” and its Role in the Second Quantum Revolution

EZEQUIEL IRIGOYEN ^a

<https://orcid.org/0000-0002-2626-5168>

ezequielirigoyen@hotmail.com

ALEJANDRO ROTA ^a

<https://orcid.org/0009-0002-5072-8115>

alejandro_rota@hotmail.com

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

Resumen

A lo largo de la historia, las ciencias fácticas tuvieron como objetivo tanto el control como la comprensión de los fenómenos naturales. No obstante, durante muchos años (y persistiendo en cierta medida hasta la actualidad), esta fructífera simbiosis fue anulada por una postura “instrumentalista”, que considera todo intento de comprender los fenómenos observables por medio de una imagen del mundo subyacente (inobservable) como un mero “relato” metafísico. Relato que resultaría innecesario —en el mejor de los casos— o incluso dañino para la empresa científica. El presente artículo pretende demostrar que, más allá de los compromisos que desde la filosofía se decida asumir —o no— con el realismo, algunos episodios de la historia de la ciencia muestran que la actitud realista en el nivel científico puede ser parte importante de los factores que motorizan descubrimientos. Para ello, nos centraremos en un caso paradigmático de la mecánica cuántica, la postulación y posterior aceptación de uno de los fenómenos más revolucionarios de la segunda mitad del siglo pasado, las “correlaciones no locales”. Sostendremos que fue la actitud realista de científicos como Einstein, Bohm y Bell —entre otros— la que impulsó las investigaciones que derivaron finalmente en dicho descubrimiento, investigaciones que no encontraron motivación alguna desde una mirada antirrealista de la ciencia.

Palabras clave: Metafísica científica; Mecánica cuántica; No-localidad; Realismo científico; Instrumentalismo.

Abstract

Throughout history, the objective of factual sciences has been both the control and the understanding of natural phenomena. However, for many years (and to a certain extent still persisting today), this fruitful symbiosis was nullified by an “instrumentalist”

position, which considers any attempt to understand observable phenomena by means of an image of the underlying (unobservable) world as a mere metaphysical “tale”. A tale that would be unnecessary — at best — or even harmful to the scientific enterprise. This article aims to demonstrate that, beyond the philosophical commitments one decides to assume — or not — with realism, some episodes in the history of science show that a realistic attitude at the scientific level can be an important part of the factors that drive discoveries. To do so, we will focus on a paradigmatic case of quantum mechanics, the postulation and subsequent acceptance of one of the most revolutionary phenomena of the second half of the last century, “non-local correlations.” We will argue that it was the realistic attitude of scientists such as Einstein, Bohm and Bell — among others — that drove the research that would ultimately lead to this discovery, research that found no motivation from an anti-realist view of science.

Key words: Metaphysics of Science; Quantum Mechanics; Non-Locality; Scientific Realism; Instrumentalism.

1. Introducción

A lo largo de la historia, las ciencias fácticas tuvieron como objetivo tanto el control como la comprensión de los fenómenos naturales. Comprensión, como el objetivo de explicar, entre otras cosas, los mecanismos causales subyacentes a dichas dinámicas. Ambas metas, lejos de contraponerse, se retroalimentan: la mejor comprensión de un fenómeno permite, generalmente, un mayor control, y la capacidad de controlar un fenómeno puede aumentar sensiblemente la posibilidad de entenderlo.

No obstante, durante muchos años (y persistiendo en cierta medida hasta la actualidad), esta fructífera simbiosis fue anulada en honor del neo-positivista “Cállate y calcula” (Mermin, 1989, p. 9). Esta frase fue acuñada, según su autor, para denunciar la actitud instrumentalista de la interpretación de Copenhague¹, la cual obturaba la búsqueda de una

¹ “Interpretación de Copenhague” es la interpretación conceptual de la denominada mecánica cuántica ortodoxa. Entre sus principales preceptos se encuentran el principio de indeterminación de Heisenberg, el principio de complementariedad de Bohr y la interpretación estadística de la función de onda de Born, junto al postulado del colapso de Von Neumann. Se ha argumentado, y con razón, que no existe una absoluta unicidad entre sus defensores. Pongamos un ejemplo, a modo de ilustración. Bohr no pensaba el colapso como un fenómeno real, sino como un mero artefacto del formalismo, cuyo propósito “no es revelar la esencia real del fenómeno sino sólo el de rastrear [...] las relaciones entre los múltiples aspectos de nuestra experiencia” (Bohr, 1961, p. 18). Heisenberg, en cambio, sostenía al colapso como un proceso físico objetivo, el cual se producía por la intervención del aparato de medición (el cual actualizaba la potencialidad ínsita en la función de onda), no (a lo Von Neumann y Wigner) por la subjetividad de quien lo empleaba: “Se aplica al acto físico (no al psíquico) de la observación, y podemos decir que la transición entre la

ontología de los fenómenos microscópicos individuales y de las relaciones causales entre ellos. No resulta casual la similitud entre su programa y el del círculo de Viena:

La interpretación de la mecánica cuántica tuvo lugar en un contexto filosófico en el cual el positivismo lógico era muy fuerte. Esto tuvo el efecto de limitar considerablemente las perspectivas disponibles y cimentó el camino de la aparición de la interpretación "ortodoxa" o de "Copenhague". Los defensores de esta escuela eran a menudo descritos como "instrumentalistas", para los cuales investigar la realidad carecía de sentido. Clamaban solo trabajar con observables, fenómenos medibles, relegando cualquier otra cuestión al reino de la metafísica. La mecánica cuántica era vista por ellos meramente como un conjunto de reglas de cálculo que permitían la predicción de resultados experimentales (Marage & Wallenborn, 1999, p. 173)

Hubo una interesante simbiosis entre el Círculo de Viena y la mecánica cuántica ortodoxa²: el primero funcionó como condición de posibilidad histórica del segundo³, y el segundo sirvió como corroboración empírica de los asertos de los primeros. La mecánica cuántica ortodoxa (MC, a partir de ahora) no solo tomaba a las descripciones metafísicas de los inobservables como indeseables o innecesarias; sostenía que tales descripciones, al menos en el mundo microscópico, resultaban imposibles. Esta postura era consecuencia de concebir los conceptos clásicos como fundamentales y de la resistencia de los sistemas microscópicos a tales descripciones (al estar sujetos a extraños fenómenos de interferencia, superposición y medición cuántica):

'potencia' y el 'acto' tiene lugar tan pronto como se produce la interacción entre el objeto y el instrumento de medida, y, con ello, el resto del mundo; no se relaciona con el acto de registrar el resultado en la mente del observador.'" (Heisenberg, 1959, p. 39).

² Denominamos como mecánica cuántica ortodoxa a la formulación de Von Neumann, que significó la sistematización que se volvió estándar. En *La Fundación Matemática de la Mecánica Cuántica* (*Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*, 1932), Von Neumann introdujo las técnicas de Hilbert, replanteó los problemas termodinámicos en términos de matrices de densidad (la entropía de Von Neumann), brindó la primera formulación clara del problema de la medición, y creó el teorema de la imposibilidad de variables ocultas, del cual se hablará más adelante. Emplearemos en forma intercambiable los términos "mecánica cuántica ortodoxa" e "interpretación de Copenhague", considerando al segundo como la interpretación filosófica del primero, de carácter más instrumental.

³ De no haber mediado el paradigma neopositivista, difícilmente se podría haber impuesto una teoría tan rupturista con la física clásica.

Los conceptos de la física clásica son simplemente un refinamiento de los términos de la vida diaria, y constituyen una parte esencial del lenguaje en que se apoya toda la ciencia natural. Nuestra situación actual, en ciencia, es tal que empleamos los conceptos clásicos para la descripción de los experimentos, y el problema de la física cuántica era el de encontrar una interpretación teórica de sus resultados sobre esta base. Es inútil discutir qué podríamos hacer si fuéramos seres distintos (Heisenberg, 1959, p. 40).

Es por esto que la interpretación de Copenhague concluía que brindar una imagen objetiva de los fenómenos cuánticos era imposible. Si al paradigma neopositivista le sumamos que la teoría más aceptada del mundo microscópico obturaba cualquier intento metafísico de explicar las entidades inobservables, no es extraño que el instrumentalismo se haya impuesto como norma. Si bien el programa del Círculo cayó por su propio peso, las interpretaciones actuales en pugna (la teoría de colapsos espontáneos, la mecánica bohmiana, muchos mundos, etc.) con la MC aún son desacreditadas por gran cantidad de físicos como meros desvaríos de filósofos⁴.

El presente artículo pretende demostrar que, más allá de los compromisos filosóficos que desde la filosofía se decida asumir —o no— con el realismo, algunos episodios de la historia de la ciencia muestran que las actitudes realistas en el nivel científico pueden ser parte importante de los factores que motorizan descubrimientos⁵. Para ello, nos centraremos en un caso paradigmático de la MC, la postulación y posterior aceptación de uno de los fenómenos más revolucionarios de la segunda mitad del siglo pasado: las “correlaciones no locales”⁶. Sostendremos que fue la actitud realista de científicos como Einstein, Bohm y Bell —entre otros— la que impulsó las investigaciones que derivaron finalmente en dicho descubrimiento, investigaciones que no encontraban motivación alguna desde una mirada “instrumentalista” o antirrealista de la ciencia. Para tal fin, dedicaremos la Sección 2 a reconstruir pormenorizadamente las etapas de su descubrimiento,

⁴ Esto no implica aseverar que todos los físicos sean instrumentalistas (por nombrar un solo caso, en cosmología cuántica la teoría de muchos mundos es bastante aceptada), pero sí es cierto que la propuesta de Copenhague es la visión preponderante, de lo cual se desprenden ciertos prejuicios hacia interpretaciones diferentes. Y, si bien el instrumentalismo de Copenhague es argumentable, muchos de sus defensores creen en alguna suerte de realismo y no comparten ciertos detalles bohrianos de la propuesta: creen, por ejemplo, que el colapso realmente existe, que la dualidad onda-partícula es real, etc.

⁵ Con esto no pretendemos defender la verdad del realismo, sino lo fructífero que puede resultar como herramienta heurística en la práctica científica.

⁶ Nuestro argumento se circunscribe a la mecánica cuántica no relativista. Debería reevaluarse en los casos de la mecánica cuántica relativista.

pasando desde las sospechas de Einstein al respecto de la incompatibilidad de ciertas predicciones de la MC con la relatividad especial (RE), hasta la postulación teórica de la no localidad a cargo de Bell, y su posterior corroboración (que, con el tiempo, derivó en la aceptación de las correlaciones no locales como hechos brutos de la naturaleza). En la Sección 3, mostraremos que todos los involucrados en dicho descubrimiento encontraron motivación para sus investigaciones en su postura realista de la ciencia. En la Sección 4, nos propondremos demostrar que solo una postura realista pudo motivar tales investigaciones, debido a su relación con la metafísica científica, en tanto solo la actitud realista de buscar un marco ontológico que dé cuenta de los fenómenos podía derivar en la aparente incompatibilidad entre la MC y la RE. Finalmente, en la Sección 5, analizaremos qué tipo de metafísica científica fue la que fomentó el descubrimiento de las correlaciones no locales.

2. Las extrañas correlaciones de la mecánica cuántica

En la MC existen, desde sus inicios, ciertas predicciones de la ecuación de Schrödinger aplicada a varios cuerpos que terminaron resultando en el, para muchos, mayor descubrimiento en física cuántica de la segunda mitad del siglo pasado. De hecho, el Premio Nobel 2022 en física fue otorgado a quienes contribuyeron teórica y experimentalmente a su corroboración (los galardonados fueron Alan Aspect, John Clauser y Anton Zeilinger). ¿Cuál es el nombre del fenómeno descubierto? ¿Qué llevó a su contrastación? Antes de responder, debemos reponer las predicciones que originaron todo.

Dos partículas entrelazadas de $\frac{1}{2}$ espín cada una, P1 y P2, son creadas en estado singlete y conducidas en direcciones opuestas. Como en el estado singlete los estados de los subsistemas están anti-correlacionados, si se mide, mediante un experimento tipo Stern-Gerlach, en el mismo eje los spines S1 y S2, y S1 da como resultado +1, entonces de S2 debe necesariamente obtenerse -1. Esto sucede porque en casos de entrelazamiento entre los estados de dos o más sistemas físicos solo el estado del conjunto representa lo que se conoce como estado puro. Esto implica que cuando dos o más sistemas están entrelazados solo juntos tienen propiedades de cierta clase con valores definidos. En el caso particular, esto conlleva a que únicamente el todo tiene un valor de espín definido (el total de espín);

La propiedad de espín total indica la manera en que las partes están relacionadas con respecto al espín en cualquier dirección, aunque no es el caso de que cada parte tenga espín en alguna dirección particular

—lo que tendría, en todo caso, es un espín opuesto al del otro sistema— (Esfeld, 2004, p. 611).

Esto era con todo lo que contábamos hasta la escritura del artículo EPR (Einstein et al., 1935); predicciones de unas extrañísimas correlaciones⁷.

Einstein desconfiaba de la MC debido a su indeterminismo, sus extraños saltos cuánticos, y por no proveer una ontología ni una explicación mecánico causal de sus fenómenos en el espacio-tiempo, tal como se lo expresó a Sommerfeld luego del V Congreso de Solvay: “Pienso que la Mecánica Cuántica contiene tanta verdad sobre la materia ponderable como la teoría de la luz sin fotones. Puede ser una teoría estadística correcta, pero provee una concepción insuficiente de los procesos elementales individuales.” (Hermann, 1968, p. 112). De hecho, son célebres sus debates con Bohr, figura principal del grupo de Copenhague, producidos en los congresos de Solvay de 1927 y 1933. Debates que, según los afortunados curiosos, Einstein una y otra vez perdió, a pesar de su genio:

Generalmente nos reuníamos primero durante el desayuno en el hotel, con Einstein empezando a describir un experimento ideal en el cual él pensaba que las contradicciones internas de la interpretación de Copenhague resultaban especialmente visibles [...] Durante las reuniones y particularmente en las pausas, nosotros, los jóvenes, mayormente Pauli y yo, tratábamos de analizar el experimento de Einstein, y en el almuerzo los análisis continuaban entre Bohr y los otros miembros de Copenhague [...] Bohr usualmente terminaba el análisis completo al finalizar la tarde, para mostrárselo a Einstein durante la cena. Einstein nunca pudo presentar buenas objeciones, pero igualmente nunca pudo ser convencido en su corazón. Ehrenfest, el amigo de Bohr, que fue a su vez cercano a Einstein, le dijo, “¡Estoy avergonzado de vos, Einstein! ¡Te pones a vos mismo en la misma posición de nuestros detractores en su fútil intento de refutar tu teoría de la relatividad!” (Heisenberg, 1967, p. 107).

El artículo EPR funcionó tanto como el primer puntapié del descubrimiento del fenómeno de entrelazamiento, como el último debate entre ambos colosos. Los autores inician el artículo mediante una crítica velada a la postura antirrealista de la MC:

⁷ Tomamos como base la reproducción de Aharonov y Bohm (1957), siendo que la propiedad de espín es más asequible matemáticamente (Bohm, 1951, p. 614) que las de posición y momentum empleadas por EPR. Por algo fue la elegida por Bell en la construcción de su teorema.

Cualquier consideración seria de una teoría física debe tener en cuenta la distinción entre la realidad objetiva, que es independiente de cualquier teoría, y los conceptos físicos con los cuales la teoría opera. Estos conceptos están destinados a corresponder con la realidad objetiva, a partir de los cuales creamos una imagen de ella. (Einstein et al., 1935, p. 777)

¿Por qué significa esto una crítica velada a la MC? Porque Bohr sostenía, instrumentalmente, que su teoría no podía llegar a ser más que una máquina predictiva, descartando cualquier imagen del mundo microscópico subyacente a ella:

No sé qué es la mecánica cuántica. Pienso que estamos lidiando con ciertas herramientas matemáticas que son adecuadas para la descripción de nuestros experimentos. Usando una rigurosa teoría de ondas [en referencia a la mecánica ondulatoria, propuesta por Schrödinger en el V Congreso de Solvay] estaríamos postulando algo que la teoría posiblemente sea incapaz de dar (Bohr citado por Bacciagaluppi & Valentini, 2009, p. 489).

De su concepción acerca de cómo debe ser una teoría física, EPR deriva dos criterios: el de completitud y el de realidad física. El primero, como seguramente se intuya, es el que determina si una teoría es completa o no: "todo elemento de la realidad física debe tener una contraparte en la teoría física" (p. 777). El segundo, en cambio, es el que determina cuándo de una predicción debe derivarse una aserción de realidad física: "Si, no distorsionando el sistema de ninguna manera, podemos predecir con certeza (por ejemplo, con probabilidad igual a uno) el valor de una cantidad física, debe existir un elemento de realidad física correspondiente a esa cantidad física" (p. 777).

Este segundo criterio es el que EPR aplica para aseverar realidad física detrás de las predicciones:

En consecuencia, midiendo tanto A o B nos encontramos en posición de predecir con certeza, y sin distorsionar de ninguna manera el segundo sistema, tanto el valor de la cantidad P (p_k) como el valor de la cantidad Q (q_r). De acuerdo a nuestro criterio de realidad, en el primer caso debemos considerar la cantidad P como un elemento de la realidad, en el segundo caso, la cantidad Q , como un elemento de la realidad (Einstein et al., 1935, p. 780).

Si solo por medir A podemos deducir con absoluta certeza el valor de B, tal como sostienen las predicciones de los estados singlete, y si aplicamos a esto el criterio de realidad, debemos aseverar que detrás del valor de B siempre hubo un elemento de la realidad que la medición solo desvela. Como este elemento de realidad no figura en la MC, EPR concluye el artículo con la siguiente dicotomía: o el resultado de B estaba predeterminado antes de medirse A por un elemento de la realidad no contemplado por la MC (con lo cual, esta sería incompleta) o, de ser la MC completa, el resultado de A determina el resultado de B:

Esto hace que las realidades de P y Q [momentum y posición, respectivamente] dependan del proceso de medición llevado a cabo en el primer sistema, que no distorsiona al segundo sistema de ninguna manera. Ninguna definición de realidad razonable puede esperarse que permita esto (Einstein et al., 1935, p. 780).

¿Por qué no sería razonable? Los primeros en advertirlo son Aharonov y Bohm (1957, p. 1071), quienes sostienen que esto sería “inaceptable” si dicha afectación del resultado de A sobre B se diese entre conos separados espacialmente, lo cual va en contra de la concepción de causalidad de la RE. Esto es porque, si postulamos que existe algún tipo de causación entre detectores en experimentos tipo Bell, ello implicaría una causalidad entre distintos conos de Minkowski. Y esto es algo vedado por la RE, ya que el único modo de conectar causalmente dos eventos es que estén separados por un intervalo de tipo *time-like* o *light-like* (a velocidades menores a c en el primer caso e iguales a c en el segundo). Dicho de otro modo, para que dos eventos estén conectados es necesario que se pueda viajar de uno al otro sin superar c . Y esto delimita, a su vez, los conos de Minkowski.

Entonces, cuando dos eventos están separados por intervalos *space-like*, la única manera que tendrían de interactuar es a velocidades mayores a c . Es decir, a velocidad supralumínica, lo cual está vedado por la RE, en carácter de principio. De hecho, la mera posibilidad de ello conllevaría a ciertos contrasentidos. En primer lugar, una velocidad supralumínica atentaría contra el concepto mismo de causalidad. Uno de sus componentes indiscutidos es que la causa preceda temporalmente al efecto. Y esto no es posible entre eventos separados por intervalos *space-like*, donde no hay continuidad temporal, por lo que desde distintos marcos de referencia el mismo evento podría tomarse como causa o como efecto. Para no caer en esto, se debería aceptar algún tipo de privilegio entre marcos de referencia, lo que atentaría contra la invariancia de Lorentz, corazón de la RE. En segundo lugar, un aspecto no menor, es que dichas velocidades habilita-

rían ciertas indeseables consecuencias: de existir señales superlumínicas, un observador podría enviar una señal que otro recibe y responde antes del envío original, lo que implicaría la posibilidad de enviar información al pasado y generaría paradojas temporales.

Siendo que la única manera de evitar estas causaciones superlumínicas era a través de la introducción en la MC de variables ocultas (las cuales predeterminarían los resultados), y que esto se encontraba vedado por el teorema de Von Neumann (1932), el asunto quedó en la nada. Lo que se suponía, en realidad, es que estas extrañas correlaciones de resultados no se cumplirían a suficiente distancia⁸.

No es hasta 1964 que el fenómeno volvió a pensarse en serio. Bell, impulsado por su atracción hacia la teoría cuántica propuesta por Bohm (1952), es quien empieza a explorarlo. Esto sucedió porque la teoría de Bohm contaba con variables ocultas (la posición de las partículas) y lograba ser empíricamente equivalente a la MC, desafiando la restricción de von Neumann, la cual "sostenía" que la MC era completa e insuplementable; todo intento de agregar variables a las ecuaciones de la MC, argumentaba el autor, conllevaría a predicciones diferentes.

Ante esta contraprueba presentada por Bohm, Bell (1966) se propone analizar el teorema de von Neumann, donde descubre su "falla"¹⁰. Una vez "liberado" de la restricción impuesta por von Neumann, Bell (1964)¹¹ toma el desafío einsteniano y se dispone a suplementar la MC con variables, buscando explicar las extrañas correlaciones desde supuestos relativistas. Estrictamente, lo que Bell hace con su teorema, teoría de conjuntos

⁸ Esto es sugerido, entre otros, por Bell (1964, p. 199), Einstein (Aharonov & Bohm, 1957, p. 1071) y Holland (1993, p. 483).

⁹ El significado de estas comillas se dilucidará en la próxima nota.

¹⁰ Bell sostiene que la conclusión de que no es posible agregar variables ocultas a la MC sin alterar sus predicciones no se sigue, siendo que una de sus premisas, particularmente la de la aditividad de los valores esperados, es arbitraria e irrealizable en la práctica (Bell, p. 449). Lo mismo sostiene Einstein, según Wick (1998, p. 286). Según Dieks (2017), en cambio, Bell comete dos errores. En primer lugar, Dieks asevera que Bell saca de contexto la premisa de aditividad, la cual en realidad se trataba de un enunciado analítico "independiente de la teoría cuántica e independiente de su representación matemática" (p. 142). En segundo lugar, Dieks afirma que la conclusión que Bell le atribuye al teorema es errónea: Von Neumann no prohíbe toda introducción de variables ocultas, sino solo las no contextuales (p. 136). Resulta curioso que esta interpretación del teorema, la más aceptada actualmente, sea igual a la esgrimida por Bohm en sus artículos fundacionales (1952, p. 181). Bell la conocía, pero la descartó aseverando que el argumento de Bohm carecía de claridad y precisión (1966, p. 447). Se agradece la invaluable contribución de un referí anónimo al respecto de esta controversia.

¹¹ Solo por cuestiones editoriales es que se publicó primero el artículo donde Bell crea su famoso teorema.

mediante, es agregar a las ecuaciones una variable que determinase los resultados de medición antes de que las partículas lleguen a los detectores, teniendo en cuenta todas las opciones y combinaciones posibles. Intenta recuperar las predicciones de los estados *singlete* en forma de que las correlaciones no se deban a extrañas interacciones entre los detectores. ¿Cómo? Alegando que los resultados de medición se encontraban predeterminados antes de llegar a ellos. Las conclusiones del teorema, no obstante, distaron de ser las esperadas:

En una teoría en la cual se le agregan parámetros a la mecánica cuántica para determinar los resultados individuales, sin cambiar las predicciones estadísticas, debe haber un mecanismo donde la configuración de un aparato de medición pueda influenciar al otro, sin importar la distancia (Bell, 1964, p. 199)

En resumen: Einstein sostuvo que o la MC era incompleta y los resultados de las predicciones de los fenómenos *singlete* estaban predeterminados (siendo lo que determinase esos resultados las variables ausentes de la teoría), o debían existir acciones a distancia. Como Bell prueba que el primer camino es imposible¹² (siendo que conduce a predicciones diferentes), de la anterior dicotomía deduce la siguiente: o las predicciones de la MC son incorrectas (al menos a distancias tipo espacio) o debe existir algún tipo de causación no local (NL) entre los detectores. Vale la aclaración de que los términos “acción a distancia”, “acción inmediata” y NL apuntan al mismo fenómeno, el cual se explicará a continuación.

Imaginemos, nuevamente, dos partículas en estado *singlete* de $\frac{1}{2}$ espín cada una y dos aparatos de medición espacialmente separados. La MC sostiene que el segundo resultado se va a correlacionar al primero según el eje de medición de ambos detectores y el resultado del primero, que es de carácter estocástico (50/50). Es decir, antes de llegar a los detectores, existe una probabilidad de 50/50 de obtener espín arriba o espín abajo en cada aparato Stern Gerlach. Lo que sucede es que, cuando la primera partícula llega a uno, y se determina en base a esa probabilidad, la probabilidad de la otra cambia instantáneamente, sin importar la distancia, pasando de una incertidumbre del 50/50 a una certeza del 100% de cuál va a ser su resultado. ¡Y esto sucede aun suponiendo un cambio del eje de medición

¹² Estrictamente, lo que prueba Bell es que una teoría realista local de variables ocultas no puede reproducir las predicciones de la MC. Como esta era la única forma de evitar la NL, según Einstein, de esto se sigue que o las predicciones de la MC se rompen a distancias tipo espacio o que debe existir algún tipo de no localidad en el mundo.

del primer fenómeno medido un milisegundo antes de su llegada! ¿Cómo puede la segunda partícula “saber” cuál fue tanto el resultado como el eje de medición de la primera para (anti-)correlacionarse?¹³ Todo indicaría que la información del resultado del primer fenómeno medido, junto al eje de medición empleado, debe de llegar de forma inmediata al segundo detector en orden de que su resultado se correlacione. Como este tipo de causación (entre fenómenos separados espacialmente) está vedado por la RE, la cual solo permite causaciones “locales”, es que se llamó a este fenómeno como NL.

No fue hasta 1982 (Aspect et al.) que la cuestión se decidió experimentalmente. De haberse corroborado las predicciones consistentes con el teorema de Bell, no habría habido mayor problema, y tanto este artículo como toda la investigación posterior no hubiesen tenido razón de ser; no fue el caso. Y las predicciones de la MC no se corroboraron una sola vez, sino hasta el hartazgo. ¿Significó esto la aceptación de la NL? No, por el contrario, derivó en la creación de estrategias para evitar la NL. Siendo que esta se sigue del teorema de Bell y de la evidencia experimental, ambos fueron criticados: al primero se le atribuyeron premisas ocultas; a los experimentos, resquicios (*loopholes*). La NL no fue aceptada aun cuando ninguna de estas estrategias —en mayor o menor medida— logró llegar a buen puerto. Todo a lo que se llegó fue al reconocimiento del fenómeno de las correlaciones NL como un hecho bruto de la naturaleza. ¿Por qué? Porque intentar explicar qué las subyace puede implicar, según la interpretación, incompatibilidades teóricas con la RE. Peor, vale decir, hubiese sido no reconocerlas en absoluto.

3. El realismo científico y su rol en el descubrimiento de las correlaciones no locales

Como dijimos, el resultado de todo este proceso —iniciado por Einstein y continuado por los demás— derivó en la corroboración de la predicción de la MC en lo concerniente a las partículas entrelazadas en estado *singlete*, incluso en los casos en que los detectores se encuentran a distancias tipo espacio. Es decir, derivó en la aceptación de un nuevo fenómeno, las “correlaciones NL”, y en su aplicación exitosa en diversas disciplinas. Todo lo cual supone un gran avance para la ciencia. Consideramos que esto resulta un caso paradigmático que ejemplifica nuestra tesis: que una actitud realista resulta uno de los grandes motores del progreso científico.

¹³ Solo de esa manera el segundo fenómeno podría correlacionarse de manera perfecta. De estar configurados los detectores en distintos ejes, el segundo resultado no se correlacionaría de forma perfecta (al 100%), y de ser otro el outcome del primer fenómeno medido, el segundo (suponiendo los mismos ejes de medición), debería ser diferente.

De no haber mediado la postura realista einsteniana, que lo instó a aplicar el criterio de realidad a las predicciones de los estados *singlete*, no se hubiese puesto la lupa en el significado físico de las correlaciones. Recordemos que para la MC no había imagen del mundo detrás de los fenómenos microscópicos. De ser por sus preceptos, no hubiese tenido sentido investigar el trasfondo de las correlaciones, ya que toda explicación mecánico-causal se encontraba vedada, dado que “Porque todos los experimentos están sujetos a las leyes de la mecánica cuántica y por lo tanto por la ecuación $p_1 q_1 \sim h$, se sigue que la mecánica cuántica establece la invalidez definitiva de la ley de causalidad” (Heisenberg, 1927, p. 197).

No menor resultó el aporte de Bell, quien fue un gran promotor de la teoría de Bohm, por significar una enmienda realista¹⁴ al instrumentalismo de la MC:

¿Por qué la teoría de la onda piloto es ignorada en los manuales? ¿No debería ser enseñada, no digo como la única interpretación válida, pero al menos como un antídoto posible a la complacencia prevaleciente? Uno capaz de mostrar que la vaguedad, la subjetividad, y el indeterminismo no son forzados a nosotros por hechos experimentales, sino por elecciones teóricas deliberadas (Bell, 1987, p. 160).

De hecho, Bell, en una entrevista citada por Bricmont (2016, p. 184), asevera que el motor de la construcción de su teorema fue el haber descubierto que la teoría de Bohm era explícitamente NL:

Cuando me di cuenta de ello [que la teoría de Bohm era no local] me pregunté “¿Es inevitable o podría alguien más inteligente que Bohm haberlo hecho diferente y haber evitado esta no localidad?” Ese es el problema al que ese teorema alude. El teorema dice: “¡No! Aun si eres más inteligente que Bohm, no te vas a librar de la no localidad, cualquier formulación matemáticamente precisa de lo que en realidad está pasando tendrá esa no localidad”.

No resulta de menor importancia resaltar que la teoría de Bohm, eslabón clave en la construcción del teorema de Bell, fue motivada por Einstein¹⁵ y su rechazo a la interpretación instrumentalista de la MC. Hasta el

¹⁴ Su interpretación volvió causal, determinista y ontológica a la MC. Logró lo que parecía imposible: brindó una interpretación determinista y causal de los fenómenos microscópicos en el espacio-tiempo.

¹⁵ Resulta interesante resaltar que a Einstein no le gustó la propuesta bohmiana, a

año anterior a la introducción de su propuesta, Bohm no solo era un adepto a la interpretación de Copenhague, sino que realizó la mejor sistematización (1951), al menos hasta ese momento, de sus preceptos. Esto duró hasta que, poco tiempo después de su publicación, se lo mostró a Einstein: "quien convenció a Bohm sobre lo inadecuado de esta propuesta (y en particular lo convenció de la 'incompletitud' de las descripciones de estado de la mecánica cuántica ortodoxa)" (Bricmont, 2016, p. 105).

El descubrimiento de las correlaciones NL fue fruto de criterios realistas sobre los objetivos de la ciencia, sobre el poder explicativo que ella debe brindar y sobre la ontología que ella debe proveer. Si Einstein no hubiese aplicado sus criterios realistas a las predicciones sobre los estados *singlete*, si no hubiese luchado durante tanto tiempo con la interpretación probabilística de la MC, quizás el descubrimiento de las correlaciones NL nunca se hubiese dado. Y, por más que se trate de un improbable contrafáctico, no se debe soslayar que tuvieron que pasar 29 años desde EPR para que viniese Bell a tomar el asunto en serio, y 18 años más para que apareciese Aspect para corroborarlo. ¿Cuántos años más hubiese tomado su descubrimiento de ni siquiera haber mediado EPR? Bohm fue un eslabón necesario en su descubrimiento ya que Bell, debido a su interés en la teoría por su postura netamente realista y a su carácter explícitamente NL, investigó la dicotomía EPR para resolver su "aparentemente" mayor problema. Bell, al descubrir la inevitabilidad de la NL, logró así convertir el peor defecto de la teoría de Bohm en su mayor virtud. Accidentalmente y por las razones equivocadas¹⁶ pero por criterios realistas es que se produjo uno de los mayores descubrimientos en física cuántica de la segunda mitad del siglo pasado.

4. "Realismo heurístico"

Retrocedamos un poco y preguntémonos lo siguiente: ¿por qué sostenemos que fue una "actitud realista" la que impulsó la postulación y posterior aceptación de este nuevo fenómeno? Como vimos, fue Einstein quien explicitó las implicancias de la predicción de la MC a distancias tipo espa-

pesar de su clara raigambre realista. La criticó como "muy avara". Esto, según Norsen (2017, p. 206), se debió a que la teoría de Bohm no solo no resolvía la NL de la MC, sino que hasta la exacerbababa.

¹⁶ Einstein postuló que del entrelazamiento cuántico se podía seguir la NL solamente para sostener que la MC debía ser incompleta. Jamás creyó en ella; pensó que su contradicción con la RE podía llegar a generar el motivante suficiente para revisar la MC. De hecho, denominaba a las acciones a distancia como "Spooky actions at a distance" (*spukhafte fernwirkung*).

cio, quien notó que, de tomar a la MC como completa, esta sería no local. No obstante, no se trató de la primera objeción del laureado físico a esta teoría. Antes de llegar a esta conclusión, ya recelaba de la MC, por el hecho de que no brindaba una explicación de los fenómenos de su dominio. No ponía en duda su gran adecuación empírica y éxito predictivo, pero consideraba que una buena teoría científica también debe brindarnos una explicación de por qué los fenómenos se comportan de la manera en que se comportan.

Ahora bien, para poder explicar los fenómenos observables predichos por las teorías científicas, la ciencia se vale de entidades teóricas. Estas incluyen, en principio, a todas las entidades y estructuras/relaciones (y sus propiedades) postuladas por las teorías científicas (electrones, campos magnéticos, etc.). Desde el fracaso de los intentos reduccionistas como el del Círculo de Viena, nadie niega la utilidad —y aún la necesidad— de estos elementos teóricos en las teorías científicas; toda teoría científica los presenta. La diferencia radica en si estas entidades son consideradas como meras variables matemáticas o como representaciones que encuentran un correlato en el mundo físico inobservable. Einstein no concibe a las teorías como meras máquinas predictivas; las entidades teóricas deben brindar una explicación metafísica de lo que ocurre a nivel observable, un “relato” ontológico que dé cuenta de los fenómenos observables. En otras palabras, Einstein considera que una buena teoría científica debe presentar al menos cierto grado de poder explicativo, una exigencia claramente realista. Podemos, entonces, reformular nuestra tesis de la siguiente manera: la actitud realista de explicar los fenómenos por medio de un marco metafísico es uno de los grandes motores del progreso científico. Y esto es independiente de la verdad que puedan llegar a tener tanto los respectivos marcos como el realismo mismo. Es decir, nuestro argumento no implica —al menos necesariamente— una defensa del realismo científico en sí, sino de este tomado como herramienta heurística. Sostenemos que este “realismo heurístico”, si se quiere, es el que ha demostrado ser uno de los grandes motores de la práctica científica¹⁷. “Realismo” que puede ser compatible incluso con

¹⁷ No pretendemos sostener que el realismo heurístico, o el realismo a secas, sea el único motor del progreso científico. De hecho, el modelo estándar de física de partículas es, argumentablemente, el descubrimiento más importante de la segunda mitad del siglo XX (granjeándole 15 premios Nobel a quienes participaron en su construcción teórica o en su verificación experimental) y fue heredero del “cállate y calcula” del que hablamos en la introducción. Ambos caminos pueden ser productivos, dependiendo del caso que se trate. Lo que queremos resaltar es lo fructífero que puede resultar la adopción de un marco metafísico; pero esto no tendría sentido para un RC, que lo adoptaría de todas formas. El punto es que dicha postura pueda ser empleada desde un ARC moderado, lo que podría significarle un beneficio. Y la posibilidad de que esto suceda depende de la premisa oculta, excelentemente advertida por un referí anónimo, de que una pluralidad de posturas es un

ciertas posturas antirrealistas, en tanto solo implica la formulación de explicaciones metafísicas hipotéticas, no necesariamente la creencia en que alguna de ellas sea verdadera o aproximadamente verdadera.

De hecho, ha habido muchos casos donde un marco metafísico determinado, a la postre considerado falso, sirvió heurísticamente para el desarrollo de la ciencia. Lo mismo ha sucedido en casos donde la adopción de un marco ontológico se adoptó heurísticamente, sin creer realmente en su verdad, para luego ser reafirmada. Ejemplos de lo primero son la ley de gravitación universal, que todavía sigue siendo usada como modelo efectivo, la hipótesis del Éter, gracias a la cual Maxwell derivó la velocidad de la luz en el vacío y se describieron fenómenos como la difracción e interferencia, y la ecuación de Schrödinger misma, cuyo desarrollo se inspiró en analogía con la óptica ondulatoria y la ecuación de ondas clásica, cuya ontología fue luego puesta en duda en base a que estaba definida en el espacio de configuraciones¹⁸. Caso paradigmático del segundo escenario es la reintroducción en física del atomismo, a manos de Dalton. La teoría atómica de Dalton fue rápidamente adoptada por su valor heurístico y poder explicativo: permitía dar cuenta de muchas observaciones conocidas sobre las reacciones químicas. Fue tomada como hipótesis en base a su incompatibilidad con la teoría de las afinidades. Esta actitud cambió, perdurando hasta nuestros días, gracias a Einstein y la contrastación del movimiento browniano.

¿Por qué decimos que el realismo heurístico puede ser compatible tanto con el realismo como con el antirrealismo científico? Para contestar esta pregunta, resulta necesario analizar brevemente el debate realismo científico (RC) vs. antirrealismo científico (ARC). A grandes rasgos, la discusión se da en torno a la actitud que se toma con respecto a las entidades y/o relaciones teóricas postuladas por las teorías científicas aceptadas (Borge, 2015). El RC considera que uno debe comprometerse con la existencia de dichas entidades y/o relaciones, mientras que un ARC afirma que lo mejor es suspender el juicio en este plano, aseverando que uno sólo debe comprometerse con las afirmaciones y predicciones empíricas de las teorías. Es decir, el RC sostiene que las teorías científicas aceptadas son representaciones verdaderas (o aproximadamente verdaderas) del mundo

campo mucho más fértil que el férreo mantenimiento dogmático de sólo una.

¹⁸ Vale aclarar que la ontología de las dos últimas entidades no fue totalmente descartada. La teoría del Éter de Lorentz/Poincaré, por ejemplo, ha sido reconsiderada en base a ser empíricamente equivalente a la relatividad especial y acomodar mejor diversos fenómenos cuánticos, como la NL. Al respecto del segundo caso, no solo existe una interpretación que defiende la ontología del espacio de configuraciones (realismo de la función de onda, Albert, 1996), sino que hasta llega a aseverar, con argumentos sólidos, el carácter derivado del espacio físico.

inobservable y observable, siendo sus afirmaciones sobre el primero las que explican las predicciones del segundo. Mientras que el ARC se compromete únicamente con la adecuación empírica de dichas teorías y la creencia en que las predicciones de la teoría serán acertadas.

A su vez, la postura ARC acepta matices. Por un lado, los “instrumentalistas” consideran que la búsqueda de un marco metafísico que dé cuenta de las predicciones y adecuación empírica de las teorías científicas resulta innecesaria —en el mejor de los casos— o incluso dañina para la empresa científica. Según estos, las afirmaciones teóricas de las teorías científicas ni siquiera tienen valor de verdad, no aceptan una “interpretación literal”. Sin embargo, en la actualidad, esta rama del ARC casi no tiene adherentes, y ha dado lugar a antirrealismos más moderados (van Fraassen, 1980) que no sólo toleran dichos marcos, sino que también pueden apreciar —en ocasiones— su valor heurístico, y sostienen que los enunciados teóricos de las teorías deben ser interpretados literalmente, si bien no se comprometen con la verdad o falsedad de los mismos.

Ahora bien, si esta actitud realista —que llamamos realismo heurístico— se reduce a la mera búsqueda de marcos ontológicos/teóricos que den cuenta de la adecuación empírica y éxito predictivo de las teorías científicas, entonces podría parecer que de “realista” tiene poco. Dado que los ARC moderados la toleran y aún la valoran en ciertos casos, ya no podríamos hablar de una actitud realista, sino de una actitud meramente no instrumentalista. Pero esta actitud realista va más allá, como muestra el caso analizado. Va más allá porque —a diferencia de los ARC moderados— la creación de marcos metafísicos es una necesidad para el realista, no una opción. Para Einstein resultaba inaceptable que una teoría científica no cumpliera con los criterios de completitud y realidad física, que la MC no proveyese una ontología ni una explicación mecánico-causal de sus fenómenos. Frente a las predicciones de la MC en lo concerniente a las partículas entrelazadas en estado *single*, su actitud realista lo obligaba a ver un problema a solucionar. Este problema, como vimos, motivó la corroboración de dichas predicciones y derivó, finalmente, en la aceptación de las correlaciones NL. Por otro lado, la insatisfacción de dichos criterios por parte de la MC no supone un problema para un ARC moderado, ya que la presencia de un marco metafísico es opcional. El gran poder predictivo y adecuación empírica de la MC le bastan —en principio— a este tipo de ARC. Así, no vieron problema alguno con las predicciones de la MC y, por ende, no encontraron una motivación para llevar a cabo todo el proceso que derivó en el descubrimiento de las correlaciones NL.

¿Cuál es, entonces, la relación entre el realismo heurístico, el RC y el ARC moderado? La búsqueda de explicaciones metafísicas puede ser

considerada como un valor epistémico más para los ARC moderados, al que le otorgan mayor o menor peso según la época y que puede resultar prescindible llegado el caso. Mientras que, para los RC, toda teoría científica aceptable debe proveer al menos cierto grado de explicación metafísica, esta no es opcional, sino necesaria. Es por ello que hablamos de realismo heurístico aun cuando este es compatible con ambas posturas. Esta búsqueda de marcos metafísicos se da de forma natural en el RC, pero solo en ciertos casos en el ARC. Por ende, consideramos que casos como el estudiado en este trabajo muestran que el realismo heurístico es una actitud propia del RC pero compatible —e incluso complementaria y recomendable— con el ARC moderado, dado que puede resultar una herramienta valiosa para la práctica científica, sin por ello comprometer su postura filosófica.

Sostenemos, entonces, que fue esta actitud realista —tomada por Einstein— la que derivó en la postulación y posterior aceptación de las correlaciones NL¹⁹. Al respecto, se nos podría replicar que estas no fueron producto de la postura filosófica de Einstein frente a la ciencia, sino una derivación propia de su trabajo científico *qua* científico, independientemente de su postura filosófica. Repasemos el caso. La MC, a partir de su sistematización en 1932 a cargo de Von Neumann, era concebida como una sólida maquina predictiva que obturaba la posibilidad de descripciones individuales de los fenómenos y procesos cuánticos (solo proveía predicciones estadísticas de conjuntos de fenómenos y su ontología, de poder llamarse así, sólo constaba de *outcomes*). Una vez terminada esta “caja negra” o máquina predictiva, ¿qué deberían hacer los científicos en tanto científicos? Ponerla a prueba: introducir *incomes* y poner a prueba las predicciones. Es así como se llega a las predicciones de la MC para mediciones de espines de dos partículas entrelazadas. Hasta este punto, da lo mismo la postura filosófica del científico.

La predicción de la MC afirma que, al medir una de las dos partículas —cuyo estado se halla indeterminado antes de la medición— el estado de la otra partícula se determina al instante. Esta afirmación es previa a cualquier análisis o postura filosófica (quien acepta la MC, acepta esto) y no supone incompatibilidad alguna con la RE. Y es esta aparente incompatibilidad la que motiva toda la investigación posterior y deriva en la postulación y corroboración de las correlaciones NL, pero esta surge solo si se

¹⁹ No estamos aseverando que toda interpretación realista de las correlaciones sea NL. Existe, por ejemplo, el realismo de la función de onda, que es realista y explica las correlaciones localmente. Lo único que sostenemos es que, de no haber interpretado Einstein en forma óptica y causal las correlaciones, no se habría advertido la posibilidad de la existencia de causaciones NL.

parte de un realismo heurístico. Según Einstein, de aceptar la completitud de la MC, es necesario aceptar algún tipo de causación de la determinación de la primera partícula sobre la segunda, y —a distancias tipo espacio— esta causación solo puede ser NL. Pero el criterio de “realidad física”, la necesidad de explicar la predicción de la MC —en este caso, por medio de algún tipo de causación— es una exigencia del RC. Para un ARC no resulta imperioso postular causación alguna porque no se encuentra obligado a explicar las afirmaciones ni predicciones de las teorías científicas. Es por ello que la aceptación del fenómeno de correlaciones NL tardó tanto tiempo, en tanto la mayor parte de la comunidad científica se amparó en una lectura ARC de la MC.

Einstein, y posteriormente Bell, sugieren dos interpretaciones para la predicción de la MC. O bien esta se explica por medio de causaciones de tipo NL, chocando así con la RE, o bien los resultados de las mediciones se hallan predeterminados, evitando así dicha incompatibilidad. Ambas interpretaciones (y cualquier otra que podría haberse sugerido) surgen de la exigencia realista de dar una explicación a nivel inobservable de los fenómenos predichos. Son estas interpretaciones las que impulsan los experimentos tipo Bell y terminan confirmando la existencia de correlaciones NL, pues ponen de manifiesto que las predicciones de la MC podrían chocar con la RE, poniendo el foco de la comunidad científica en este asunto. Ante la ausencia de dicha incompatibilidad, los científicos que adoptaban una postura ARC no tenían motivo para postular teóricamente la existencia de este nuevo fenómeno ni intentar corroborarlo empíricamente. Es la interpretación causal de las correlaciones lo que choca con la RE, no el fenómeno en sí mismo (correlaciones NL o “no clásicas”) y menos aún la predicción “cruda” de la MC. La inconsistencia se da a nivel teórico, no empírico; solo una interpretación ontológica del fenómeno (necesidad de algún tipo de causación en este caso) la suscita. Inconsistencia que podría haberse salvado o no, pero el punto es que no fue advertida por la postura ARC, que no encontró motivación para analizar las consecuencias ontológicas de las predicciones que nos ocupan.

Vale aclarar que los experimentos de Bell no confirman necesariamente la existencia de causaciones NL; un ARC puede suspender el juicio con respecto a dicha interpretación²⁰. Las causaciones NL son una posible interpretación “metafísica” que puede adoptar un RC de las correlaciones NL. Es decir, no sostenemos que el científico deba comprometerse con una determinada metafísica científica para alentar el progreso científico, sino

²⁰ Pero sí debe aceptar el fenómeno empíricamente corroborado de las correlaciones NL o no clásicas, independientemente de si elige o no interpretarlas.

que la búsqueda de un marco metafísico (cualquiera sea este) puede, como en este caso, llevar a grandes avances científicos. Esto se evidencia, también, en los múltiples intentos por evitar una interpretación de causación NL de dichas correlaciones. Frente a la amenaza que supone la interpretación NL para la RE, muchos exploraron explicaciones alternativas para las correlaciones a distancias tipo espacio. El holismo relacional (Esfeld, 2004; Healey, 1994; Howard, 1989; Morganti, 2009; Placek, 2004), la retrocausalidad (Corry, 2015; Costa de Beauregard, 1976; Cramer, 1980; Dowe, 1997; Miller, 1996; Price, 1997; Sutherland, 1983; Wharton, 2007), el superdeterminismo (Andreoletti & Vervoort, 2022; Baas & Le Bihan, 2023; Hossenfelder & Palmer, 2020), y la postulación de un túnel de gusano que conecte los detectores (Holland, 1993) son solo algunas de las interpretaciones que se han ensayado como variables a la NL. Si bien estos ejemplos resultan cuando menos polémicos, dan cuenta de cómo el realismo heurístico dinamiza la investigación científica. Nuevamente, con motivo de defender la compatibilidad entre teorías, el RC se ve obligado —ante el fracaso de explicar las correlaciones mediante predeterminación de resultados— a proponer nuevas hipótesis si quiere salvar a la RE²¹. El hecho de que las alternativas citadas no hayan llegado a buen puerto no afecta nuestro punto, lo importante es que la postura RC da motivos para seguir investigando, no se contenta con la mera adecuación empírica/éxito predictivo.

5. Niveles de teorización metafísica

Finalmente, podemos distinguir niveles de teorización metafísica y especificar cuál de ellos resultó un motor del “progreso” científico en este caso. Como dijimos, el RC considera que las teorías científicas son representaciones aproximadamente verdaderas tanto en el plano observable/empírico como en el inobservable/teórico, por lo que consideran necesario desarrollar los elementos “metafísicos” de la teoría, tanto para explicar los fenómenos empíricos como para comprender ese mundo inobservable en sí mismo. Pero, ¿en qué consiste este desarrollo metafísico? Por un lado, como adelantamos, en la articulación de los elementos metafísicos de la teoría en un marco explicativo que dé cuenta de los procesos que se dan a nivel inobservable, que muestre cómo los fenómenos observables son efecto de las relaciones entre entidades inobservables. Pero el desarrollo de la metafísica científica también puede darse a través de la caracterización

²¹ O no. Se puede sostener que la corroboración de las correlaciones NL es un buen argumento para revisar la RE. De hecho, la teoría de la relatividad propuesta por Lorentz y Poincaré es empíricamente equivalente a la RE y permite causaciones inmediatas.

ontológica de dichas entidades/relaciones. Al respecto, resulta interesante la distinción trazada por Chakravartty (2020) entre niveles de teorización metafísica.

Este autor comienza por identificar a las entidades metafísicas con las “inobservables”²², es decir, con las que no son detectables usando solo los sentidos desnudos. Ahora bien, dentro de esta categoría, Chakravartty asegura que puede trazarse una distinción intuitiva basada en la práctica científica. Existen, por un lado, propiedades, entidades, eventos y procesos que son los objetos inmediatos de la teorización y experimentación científica, como los electrones, las “fuerzas del mercado”, etc. Todo compromiso con respecto a la existencia de dichas entidades y sus propiedades (con respecto a la forma en la cual interactúan con su entorno) es considerado un compromiso básico/genérico, de nivel M1, que —junto con el compromiso acerca de que las proposiciones científicas son afirmaciones sobre un mundo independiente de la mente— todo realista científico debería sostener para considerarse como tal.

Por otro lado, los compromisos que no se hallan asociados al contexto inmediato de la práctica científica corresponden a un nivel de descripción de la ontología del mundo más “refinado”, el nivel M2. En este nivel, el realista se compromete no solo con la existencia de los objetos/propiedades inobservables postulados por las teorías científicas, sino que toma posición con respecto a la naturaleza ontológica de estas. Por ejemplo, una cosa es teorizar acerca del comportamiento de los electrones en un determinado contexto (nivel M1) y otra es teorizar acerca de si las propiedades de un electrón son “intrínsecas” o “extrínsecas” (nivel M2). Una cosa es intentar explicar un proceso basándose en relaciones causales y otra preguntarse acerca de la naturaleza de la causalidad.

Esta distinción entre niveles de teorización metafísica resulta útil para nuestro trabajo, porque nos permite especificar aún más qué tipo de metafísica científica es el que puede resultar beneficiosa para el progreso científico. En este artículo, intentamos defender la idea de que el desarrollo de un marco metafísico explicativo de nivel M1 resulta uno de los motores del progreso científico, dado que el caso que tomamos como paradigmático así lo demuestra (Einstein y compañía se ocupan de explicar causalmente las predicciones de la MC, plano M1). Pero sin perjuicio de que la teorización metafísica de nivel M2 pueda —o no— serlo también²³.

²² Aclarando que llamar metafísica a toda entidad inobservable puede resultar una postura más bien radical hoy en día, propia de la época del empirismo lógico. Sin embargo, lo interesante no radica en si llamamos a estas entidades “metafísicas”, “inobservables” o “teóricas”, sino en que pueden trazarse distintos niveles de análisis de las mismas.

²³ Tesis que podría desarrollarse en otro artículo, pero que excede al presente.

6. Conclusión

La lectura instrumentalista y ARC moderada de las predicciones sobre los sistemas físicos entrelazados no encontró ningún tipo de incompatibilidad entre la MC y la RE. Fue el análisis realista einsteniano, criterio de realidad física mediante, el cual advirtió que, de tomar las correlaciones ontológicamente, podían seguirse causaciones incompatibles con la RE. Siendo que el paradigma neopositivista se encontraba en su cenit, y que Bohr parecía haber refutado su propuesta (Bohr, 1935; para un análisis del argumento, recomendamos ver Maudlin, 2014), el asunto quedó en la nada. Tuvieron que pasar 29 años, cuando el credo antimetafísico dejó de ser tan imperante, para que un físico teórico (Bell) retomase la hipótesis einsteniana y le diese encarnadura. ¿Por qué lo hizo? Para defender una teoría cuántica (Bohm, 1952) de corte realista, que intentaba brindar una representación ontológica, determinista y mecánico-causal de los fenómenos microscópicos. Teoría que, como ya se ha visto, fue creada por Bohm a instancias de Einstein y su postura RC. Esto se tradujo en el teorema de Bell, el cual concluyó que, de ser correctas las predicciones del entrelazamiento cuántico, debía aceptarse algún tipo de NL en el mundo.

Naturalmente, siendo que la NL parecía incompatible con la RE, esto provocó la necesidad de contrastación. La corroboración de las "funestas" predicciones generó una explosión en investigación teórica y experimental, todo en función de evitar las causaciones NL y sus terribles consecuencias. A nivel técnico, provocó la necesidad de creación de equipamientos de experimentación más sofisticados. Esto fue el resultado de los *loopholes* esgrimidos contra los resultados experimentales. Es decir, como la evidencia empírica corroboraba la existencia de las correlaciones NL, y estas podían ser interpretadas como incompatibles con la RE, durante mucho tiempo se la intentó anular aduciendo deficiencias en los experimentos. Gracias a ello, se produjo una enorme sofisticación en las tecnologías y métodos empleados por los experimentos tipo Bell, alcanzando su punto cúlmine en 2015 con la realización de tres experimentos inobjetables que resolvieron todos los *loopholes* (Giustina et al., 2015; Hensen et al., 2015; Shalm et al., 2015).

A nivel teórico se problematizó el teorema de Bell, provocando una profunda revisión de sus supuestos y de los de la RE, en orden de determinar dónde realmente se hallaba su incompatibilidad con la NL. Esto sucedió por la estructura misma del teorema. Recordemos que el mismo parte de ciertas premisas de las que se deducen predicciones distintas de las de la MC. De la refutación de estas últimas se siguió, naturalmente, la refutación de alguna de las premisas, entre las cuales se encontraban supuestos de la

RE²⁴. Esto provocó una intensa investigación sobre cuáles son en realidad sus supuestos y restricciones fundamentales (en orden de profundizar en el tema, recomendamos ver Friedman, 1983; Maudlin, 2011).

Se propusieron, a su vez, teorías enteras en función de resolver la aparente incompatibilidad: el holismo relacional, la retrocausalidad y el superdeterminismo, entre las más salientes. Todas con el explícito propósito de explicar las correlaciones evitando causaciones NL. La primera, y más satisfactoria, postula que las correlaciones no se deben a causaciones directas entre los fenómenos físicos, sino al holismo intrínseco del entrelazamiento del conjunto, responsable de causar los *outcomes* individuales. La segunda, mucho más extraña a nivel metafísico que las causaciones superlumínicas, postula que las causaciones se producen desde el futuro, respetando así el esquema de conos de Minkowski. La tercera, de carácter argumentablemente conspirativo, postula que los *outcomes* aparentemente correlacionados no se dan por causaciones entre los fenómenos separados, sino que están determinados desde los inicios del universo, disolviendo las correlaciones en meras casualidades. Sin contar con la postulación de agujeros de gusano, entidades teóricas capaces de conectar causalmente fenómenos espacialmente separados.

Si bien el aporte de estos desarrollos teóricos puede considerarse controversial o acotado, no puede decirse lo mismo acerca de la revolución que supuso la introducción de las correlaciones NL en la teoría de la información. Revolución que provocó 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.

Siendo que el descubrimiento de las correlaciones NL fue fruto de interpretar las predicciones de los sistemas entrelazados de forma realista, y que dicho descubrimiento generó una explosión en investigación teórica, técnica y experimental, sostenemos que el desarrollo de un marco metafísico explicativo de nivel M1 no solo no es inútil, sino que puede resultar, como de hecho resultó, una poderosa herramienta heurística capaz de dinamizar el progreso científico.

²⁴ Estrictamente, se trata de la “hipótesis 2”, la cual es bautizada por Bell como el supuesto de “localidad”: “Si las dos mediciones se realizan desde lugares remotos, la orientación de un magneto no influencia el resultado obtenido en el otro” (Bell, 1964, p. 195). Bell señala que, de corroborarse las predicciones de la MC, este es el supuesto que debe ser descartado. O, lo que es lo mismo, que debe haber algún tipo de NL en el mundo.

Agradecimiento

Deseamos expresar nuestro más sincero agradecimiento a los Dres. Bruno Borge y Cristian López por su inestimable ayuda durante el proceso de elaboración de este trabajo.

Referencias

- Aharonov, 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>
- Albert, D. (1996). Elementary quantum metaphysics. En J. Cushing, A. Fine, & S. Goldstein (Ed.), *Bohmian mechanics and quantum theory: An appraisal* (pp. 277-284). Kluwer Academic. https://doi.org/10.1007/978-94-015-8715-0_19
- Andreoletti, G., & Vervoort, L. (2022). Superdeterminism: A reappraisal. *Synthese*, 200(5), 1-20. <http://doi.org/10.1007/s11229-022-03832-6>
- Aspect, A., Grangier, P., & Roger G. (1982). Experimental realization of Einstein-Podolski-Rosen-Bohm Gedankenexperiment: A new violation of Bell's inequalities. *Physical Review Letters*, 49(2), 91-94. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.49.91>
- Baas, A., & Le Bihan, B. (2023). What does the world look like according to superdeterminism? *The British Journal for the Philosophy of Science*, 74(3), 555-572. <https://doi.org/10.1086/714815>
- Bacciagaluppi, G., & Valentini, A. (2009). *Quantum theory at the crossroads: Reconsidering the 1927 Solvay Conference*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.48550/arXiv.quant-ph/0609184>
- Bell, J. (1964). On the Einstein Podolsky Rosen paradox. *Physics*, 1, 195-200. <https://doi.org/10.1103/PhysicsPhysiqueFizika.1.195>
- Bell, J. (1966). On the problem of hidden variables in quantum mechanics. *Reviews of Modern Physics*, 38(3), 447-468. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.38.447>
- Bell, J. (1987). *Speakable and unspeakable in quantum mechanics*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511815676>
- Beller, M. (1996). Bohm and the "inevitability" of acausality. En R. Cohen (Ed.), *Bohmian mechanics and quantum theory: An appraisal* (pp. 211-230). Kluwer Academic. <https://doi.org/10.1007/978-94-015-8715-0>
- Bohm, D. (1951). *Quantum theory*. Prentice-Hall.
- Bohm, D. (1952). A suggested interpretation of the quantum theory in terms

- of 'hidden' variables (partes I y II). *Physical Review*, 85(2), 166-179 y 180-193. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.85.166>
- Bohr, N. (1935). Can quantum mechanical description of reality be considered complete? *Physical Review*, 48, 696-702. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.48.696>
- Bohr, N. (1961). *Atomic theory and the description of nature*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1119/1.1942160>
- Borge, B. (2015). Realismo científico hoy: A 40 años de la formulación del Argumento del No Milagro. *Acta Scientiarum. Human and Social Sciencies*, 37(2), 221-233. <https://doi.org/10.4025/actascihumansoc.v37i2.26933>
- Bricmont, J. (2016). *Making sense of quantum mechanics*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-25889-8>
- Chakravartty, A. (2020). Acerca de la relación entre el realismo científico y la metafísica científica. En B. Borge & N. Gentile (Eds.), *La ciencia y el mundo inobservable: Discusiones contemporáneas en torno al realismo científico*. Eudeba.
- Corry, R. (2015). Retrocausal models for EPR. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 49, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2014.11.001>
- Costa de Beauregard, O. (1976). Time symmetry and interpretation of quantum mechanics. *Foundations of Physics*, 6(5), 539-559. <https://doi.org/10.1007/BF00715107>
- Cramer, J. (1980). Generalized absorber theory and the Einstein-Podolsky-Rosen paradox. *Physical Review D*, 22(2), 362-376. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.22.362>
- Dieks, D. (2017). Von Neumann's impossibility proof: Mathematics in the service of rhetorics. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 60, 136-148. <https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2017.01.001>
- Dowe, P. (1997). A defense of backwards in time causation models in quantum mechanics. *Synthese*, 112(2), 233-246. <https://doi.org/10.1023/a:1004932911141>
- Einstein, A., Podolsky, B. y Rosen, N. (1935). Can quantum mechanical description of reality be considered complete? *Physical Review*, 47, 777-780. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.47.777>
- Esfeld, M. (2004). Quantum entanglement and a metaphysics of relations. *Elsevier*, 35(4), 601-617. <https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2004.04.008>
- Friedman, M. (1983). *Foundations of space-time theories, relativistic physics and philosophy of science*. Princeton University Press.
- Giustina, M., Versteegh, M., Wengerowsky, S., Handsteiner, J., Hochtner,

- A., Phelan, K., Steinlechner, F., Kofler, J., Larsson, J., Abellán, C., Amaya, W., Pruneri, V., Mitchell, M., Beyer, J., Gerrits, T., Lita, A., Shalm, L., Nam, S., Scheidl, T., ... Zeilinger, A. (2015). Significant-loophole-free test of Bell's theorem with entangled photons. *Physical Review Letters*, 115, 250401. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.115.250401>
- Healey, H. (1994). Nonseparable processes explanation and causal explanation. *Studies in History and Philosophy of Science*, 25(3), 337-374. [https://doi.org/10.1016/0039-3681\(94\)90057-4](https://doi.org/10.1016/0039-3681(94)90057-4)
- Heisenberg, W. (1927). Ueber den anschaulichen Inhalt der quanten theoretischen Kinematik and Mechanik. *Zeitschrift für Physik*, 43, 172-198. <https://doi.org/10.1007/BF01397280>
- Heisenberg, W. (1959). *Física y filosofía*. La Isla.
- Heisenberg, W. (1967). Quantum theory and its interpretation. En S. Rosental (Ed.), *Niels Bohr: His life and work as seen by his friends* (pp. 94-108). North-Holland.
- Hensen, B., Bernien, H., Dréau, A., Reiserer, A., Kalb, N., Blok, M., Ruitenberg, J., Vermeulen, R., Schouten, R., Abellán, C., Amaya, W., Pruneri, V., Mitchell, M., Markham, M., Twitchen, D., Elkouss, D., Wehner, S., Taminiau, T., & Hanson, R. (2015). Loophole-free Bell inequality violation using electron spins separated by 1.3 kilometres. *Nature*, 526(7575), 682-686. <https://doi.org/10.1038/nature15759>
- Hermann, A. (1968). Carta 53 del 09/11/1927. En A. Hermann (Ed.), *Albert Einstein / Arnold Sommerfeld Briefwechsel* (p. 112). Schwabe & Co.
- Holland, P. (1993). *The quantum theory of motion: An account of the De Broglie-Bohm causal interpretation of quantum mechanics*. Cambridge University Press. <http://dx.doi.org/10.1017/CBO9780511622687>
- Hossenfelder, S., & Palmer, T. (2020). Rethinking superdeterminism. *Frontiers in Physics*, 8(139), 1-24. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1912.06462>
- Howard, D. (1989). Holism, Separability, and the metaphysical implications of the Bell experiments. En J. Cushing & E. McMullin (Eds.), *Philosophical consequences of quantum theory: Reflections on Bell's theorem* (pp. 224-253). University of Notre Dame Press.
- Marage, P., & Wallenborn, G. (1999). *The Solvay councils and the birth of modern physics*. Springer. <https://doi.org/10.2307/3621708>
- Maudlin, T. (2011). *Quantum non-locality and relativity: Metaphysical intimations of modern physics*. Blackwell. <https://doi.org/10.1002/9781444396973>
- Maudlin, T. (2014). What Bell did. *Journal of Physics A: Mathematical and*

- Theoretical*, 47(2), 424010. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1408.1826>
- Mermin, D. (1989). What's wrong with this pillow? *Physics Today*, 42(4), 9-11. <https://doi.org/10.1063/1.2810963>
- Miller, D. (1996). Realism and time symmetry in quantum mechanics. *Physics Letters A*, 222(1/2), 31-36. [https://doi.org/10.1016/0375-9601\(96\)00620-2](https://doi.org/10.1016/0375-9601(96)00620-2)
- Morganti, M. (2009). A new look at relational holism in quantum mechanics. *Philosophy of Science*, 76, 1027-1038. <https://doi.org/10.1086/605809>
- Norsen, T. (2017). *Foundations of quantum mechanics: An exploration of the physical meaning of quantum theory*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-65867-4>
- Placek, T. (2004). Quantum state holism: A case for holistic causation. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 35(4), 671-692. <https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2004.06.001>
- Price, H. (1997). *Time's arrow and Archimedes' point: New directions for the physics of time*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.2307/2653578>
- Shalm, L., Meyer-Scott, E., Christensen, B., Bierhorst, P., Wayne, M., Stevens, M., Gerrits, T., Glancy, S., Hamel, D., Allman, M., Coakley, K., Dyer, S., Hodge, C., Lita, A., Verma, V., Lambrocco, C., Tortorici, E., Migdall, A., Zhang, Y., & Nam, S. (2015). Strong loophole-free test of local realism. *Physical Review Letters*, 115(250402). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.115.250402>
- Sutherland, R. (1983). Bell's theorem and backwards-in-time causality. *International Journal of Theoretical Physics*, 22(4), 377-384. <https://doi.org/10.1007/BF02082904>
- van Fraassen, B. C. (1980). *The scientific image*. Oxford University Press.
- von Neumann, J. (1932). *Mathematische grundlagen der quantenmechanik*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-322-94058-2_6
- Wharton, K. (2007). Time-symmetric quantum mechanics. *Foundations of Physics*, 37(1), 159-168. <https://doi.org/10.1007/s10701-006-9089-1>
- Wick, D. (1998). *The infamous boundary*. Copernicus. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-5361-7>

Recibido el 11 de diciembre de 2024; revisado el 12 de junio de 2025; aceptado el 15 de junio de 2025.