

NO-LOCALIDAD: LO QUE BELL DEDUJO Y LO QUE LOS EXPERIMENTOS CORROBORARON

NON-LOCALITY: WHAT BELL DEDUCED AND WHAT EXPERIMENTS CORROBORATED

ALEJANDRO ROTA

Universidad de Buenos Aires, ARGENTINA

alejandro_rota@hotmail.com

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

Abstract. Non-locality is a physical phenomenon theoretically postulated and experimentally corroborated, which covers a causal mechanical function in the determination of singlet phenomena. It is, in turn, a central concept in information theory, cryptography and quantum computing. Despite this, and due to its apparent incompatibility with special relativity, many objections have been raised against its acceptance as a physical phenomenon. Explaining why they are not appropriate is the imperative of this work.

Keywords: Non-locality • Bell • quantum mechanics • special relativity • singlet phenomena

RECEIVED: 11/06/2024

REVISED: 23/07/2025

ACCEPTED: 20/08/2025

1. Introducción

En el mundo cuántico existen correlaciones de resultados de medición que parecerían implicar interacciones superlumínicas entre los detectores. Este fenómeno, que se sigue del formalismo de la mecánica cuántica (MC a partir de ahora) y que sucede específicamente en la dinámica de las partículas entrelazadas en estado singlete fue sugerido por Einstein, Podolsky y Rosen (1935) en orden de criticar la teoría. Siendo que la interacción entre los detectores, a distancias tipo espacio, viola el principio de localidad de la relatividad especial (al implicar acciones instantáneas), y que dicho fenómeno se sigue de tomar a la MC como empíricamente adecuada y completa, los autores concluyen el artículo afirmando la incompletitud de la MC.

Bell, en 1964, tomó en serio la preocupación de Einstein y se propuso completar la MC con variables ocultas,¹ con el objetivo de explicar las correlaciones sin caer en interacciones presuntamente imposibles. Las predicciones obtenidas, al diferir de las de la MC, lo llevaron a un escenario dicotómico: o su propuesta era la correcta, y se resguardaría la localidad, o la MC lo era, y se debería aceptar que el mundo es no-local (NL). Este escenario derivó en la creación de experimentos cruciales en pos de determinar cuáles predicciones eran las correctas; los resultados fueron siempre corroboratorios de las predicciones de la MC y, por decantación, de la NL.

Al ser un fenómeno tan contradictorio con el paradigma espacio-temporal actual (principalmente por no ser invariante ante las transformaciones de Lorentz), se plantearon muchas resistencias, tanto al teorema de Bell (TB) como a la evidencia empírica resultante de los experimentos. Al primero se le criticaron las premisas y los supuestos, a la evidencia empírica, los experimentos que la sustentaban.

Siendo que la NL es un fenómeno corroborado experimentalmente y aplicado consistentemente en diversas ramas del conocimiento (teoría de la información, criptografía, computación cuántica, etc.), resulta casi un imperativo moral rescatarlo del ostracismo y defenderlo de los vanos intentos de refutarlo. Más teniendo en cuenta que, a pesar de que el premio Nobel 2022 en física fue otorgado a quienes realizaron los experimentos que corroboraron la existencia de la NL (los galardonados fueron Alan Aspect, John Clauser y Anton Zeilinger), dicho fenómeno, tanto en la presentación del premio como en todos los medios que lo divulgaron, nunca fue mencionado.

En orden de ello, el presente trabajo tendrá el objetivo de probar por qué la NL se sigue teóricamente de la MC, argumentar sobre su corroboración empírica, así como sistematizar y refutar los distintos tipos de estrategias empleadas en orden de evitar su aceptación. En el camino de su fundamentación se hablará, a su vez, acerca de los proyectos existentes en orden de compatibilizar la NL con la relatividad especial, “incompatibilidad” que dio origen a todos los intentos de su refutación.

Argumentar sobre la ontología de la NL no es algo caprichoso, sino el intento de saldar la deuda moral que la comunidad científico-filosófica tiene con Bell: 60 años han pasado de su descubrimiento (el cual es considerado por muchos como el de mayor impacto en física teórica del siglo pasado), 42 de su corroboración empírica; ya es tiempo de que, en vez de intentar refutar sus logros, empecemos a explorar el mundo nuevo que ellos nos han abierto.

2. Génesis del teorema

El TB (1964) nace como una respuesta al artículo “Can quantum mechanical description of reality be considered complete?” de Einstein, Podolsky y Rosen (1935), donde dichos autores se propusieron demostrar la incompletitud de la MC. En él, los autores aludidos analizaron las predicciones de la MC para mediciones de posición y momentum de dos partículas entrelazadas, las cuales implicaban correlaciones entre *outcomes* sólo aparentemente explicables por causaciones entre detectores. Al ser esto inaceptable (por resultar incompatible con la relatividad especial), postularon que la MC debía ser incompleta, ya que carecía de una explicación compatible con dicha teoría.

Lo que Bell hace, en consecuencia, es intentar completar la teoría con variables ocultas, en orden de lograr explicar las correlaciones mediante mecanismos locales

ínsitos dentro de los conos de los fenómenos medidos. Para ello, arranca el artículo con su propia reconstrucción de EPR (tal como se denomina al artículo de Einstein, Podolsky y Rosen), tomando como base la de Bohm y Aharonov (1957), el cual emplea mediciones de espín, propiedad más asequible matemáticamente (Bohm 1951, p.614) que las de posición y momentum.

3. EPRBell

Un par de partículas P1 y P2, de $\frac{1}{2}$ spin cada una, son creadas en estado *singlete* y conducidas en direcciones opuestas. Si se mide, magneto de Stern Gerlach mediante, en el mismo eje los spines S1 y S2, y S1 da como resultado +1, entonces de S2 debe necesariamente obtenerse -1. Lo que sostiene la MC, debido a que los espines son anti-simétricos, es que el resultado de la segunda medición siempre va a ser el contrario al de la primera.

Tomando como hipótesis que dos mediciones realizadas a distancia tipo espacio (*space-like separated*) no pueden influenciarse, y que es posible predecir con certeza el resultado de la segunda luego de medir la primera, Bell concluye que ambos resultados deben estar predeterminados. Bell emplea en la derivación, además, el indeterminismo de la MC; “Siendo que la función de onda mecánico cuántica no determina el resultado de mediciones individuales, esta predeterminación implica la posibilidad de una especificación más completa” (1964, p.195). ¿Por qué? Porque según la MC el primer resultado es de carácter indeterminista, más el segundo no.

Es decir, antes de medirse el primer fenómeno, no hay manera de saber cómo va a resultar ninguno de los dos. Pero, en el instante en que este se determina, podemos automáticamente saber cuál va a ser el otro, sin siquiera precisar medirlo. Es por esto que, de aceptar el indeterminismo de la primera medición, es necesario aceptar algún tipo de causación de la determinación de la primera partícula sobre la segunda.

De todas maneras, hasta aquí no habría inconvenientes; podría tratarse de una extraña causación, pero ¿cuál no lo es en el mundo cuántico? El problema sobreviene cuando se postula una distancia tipo espacio entre ambos magnetos,² ya que dicha interacción implicaría una causalidad superlumínica, lo cual es algo vedado por la relatividad especial, ya que ello significaría una violación a la invariancia de Lorentz. Al ser esto inaceptable, y siendo que la NL es una consecuencia del indeterminismo del primer resultado de medición, Bell llega a la conclusión de que la única manera de evitar la NL es mediante la introducción de variables ocultas que predeterminen los *outcomes* que provocan las supuestas correlaciones.

Resumiendo, la primera parte del TB sostiene que de las predicciones sobre partículas en estado singlete (PES) más el indeterminismo de la MC se sigue la NL. Es decir, explica cómo de la MC se sigue la NL. De esto Bell deduce que eliminar el inde-

terminismo de la MC es la única forma de salvaguardar la localidad (o, lo que es lo mismo, afirmar que los resultados implicados por las PES son de índole determinista). Esto implica la postulación de una teoría determinista capaz de derivar las PES. La forma específica en la que Bell le da encarnadura a dicha empresa será desarrollada en los próximos apartados.

4. Tres caminos

Las perfectas correlaciones a distancia implicadas por la MC son incompatibles con la invariancia de Lorentz, presupuesto fundamental de la estructura espacio-temporal relativista, ya que parecerían implicar una causación a velocidad superlumínica (o NL, o acción inmediata: tres expresiones sinónimas). Hay tres caminos para resolver esta aparente inconsistencia entre estas dos teorías. El primero radica en aceptar dicha causación, es decir, sostener que la relatividad especial se equivoca y que en ciertos casos existen acciones NL (Bohm y Aharonov son los primeros en hacerlo: explican la determinación de un fenómeno³ sobre el otro mediante la acción NL del potencial cuántico bohmiano (1957, p.1072)). El segundo es negar cualquier interacción entre los fenómenos alejados y sostener que los resultados fueron predeterminados por variables ocultas locales antes de llegar a los detectores (Bell). El tercero, que es el que resultaba más plausible hasta el experimento de Aspect et al. (1982), es el de sostener que las correlaciones de la MC podían no cumplirse en experimentos a suficiente distancia.⁴

El TB desarrolla la segunda posibilidad, intentando recuperar las PES desde sus supuestos. De lograrlo, se podrían explicar las correlaciones de las partículas en estado singlete mediante la predeterminación local de los resultados. En caso de no hacerlo... ¡Mejor no nos adelantemos!

5. El teorema

Debido a su dificultad, nos basaremos en la reconstrucción del teorema realizada por Travis Norsen (2017, p.218–222). Consideremos un par de partículas de $\frac{1}{2}$ espín espacialmente separadas y tres potenciales ejes de medición: \hat{a} , \hat{b} , y \hat{c} . Siendo que el estado singlete ψ_s resultante es:

$$\psi_s = \frac{1}{\sqrt{2}}[\psi_{+a}^1 \psi_{-a}^2 - \psi_{-a}^1 \psi_{+a}^2] \quad (1)$$

—lo mismo que para \hat{b} y \hat{c} — se sigue que, de acuerdo a la MC, los *outcomes* deben estar perfectamente anticorrelacionados (o “arriba-abajo” o “abajo-arriba”) siempre

que los dos experimentadores midan sus partículas en el mismo eje. La compatibilidad entre este aspecto de las predicciones de la MC con el presupuesto de localidad requiere de una teoría de variables ocultas (determinista y local) donde las probabilidades de los valores de cada uno de los tres ejes postulados por ella estén perfectamente anticorrelacionados. De dicha teoría se siguen necesariamente ocho diferentes tipos de pares de partículas (sin frecuencia cero), lo que se desprende de que sean preparados según el estado cuántico ψ_s :

| Tipo de par | Partícula 1 | Partícula 2 | Frecuencia |
|-------------|--------------|--------------|------------|
| 1 | (+1, +1, +1) | (-1, -1, -1) | F1 |
| 2 | (+1, +1, -1) | (-1, -1, +1) | F2 |
| 3 | (+1, -1, +1) | (-1, +1, -1) | F3 |
| 4 | (-1, +1, +1) | (+1, -1, -1) | F4 |
| 5 | (+1, -1, -1) | (-1, +1, +1) | F5 |
| 6 | (-1, +1, -1) | (+1, -1, +1) | F6 |
| 7 | (-1, -1, +1) | (+1, +1, -1) | F7 |
| 8 | (-1, -1, -1) | (+1, +1, +1) | F8 |

Las columnas “Partícula 1” y “Partícula 2” nos indican cómo la partícula que es miembro de un determinado par se comportará al ser medida en cada uno de los ejes. Por ejemplo, “(-1, +1, -1)” indica que la partícula tendrá “espín -1” en \hat{a} , “espín +1” en \hat{b} , y “espín -1” en \hat{c} (-1 indicando espín abajo, +1 indicando spin arriba)

Las probabilidades de encontrar resultados de medición específicos se expresan en las frecuencias F_i que aparecen en la tabla. Por ejemplo, la probabilidad de obtener “espín +”, siendo que la partícula 1 es medida en \hat{a} y la partícula 2 en \hat{b} es:

$$Pab(++) = F3 + F5. \quad (2)$$

La probabilidad de encontrar “spin -”, siendo que la partícula 1 es medida en \hat{a} y la partícula 2 en \hat{b} , es:

$$Pab(--) = F4 + F6. \quad (3)$$

Y de la misma manera pueden obtenerse todas las demás probabilidades. Siendo que F_i representa las frecuencias con las que los diferentes pares de partículas entrelazadas fueron creadas, todas deben ser positivas y deben sumar 1. Por lo que:

$$F2 + F5 \leq F3 + F5 + F2 + F6 \quad (4)$$

(siendo que el lado derecho tiene los mismos elementos que el izquierdo más dos términos adicionales que no pueden ser menores a cero). Por lo tanto, en una teoría de variables ocultas con resultados predeterminados, se debe dar que:

$$Pac(++) \leq Pab(++) + Pbc(++) \quad (5)$$

Sin importar las frecuencias F_i que tomemos, una teoría en que las mediciones de espín simplemente revelen valores preexistentes deberá hacer predicciones estadísticas que obedezcan la Ec. (5), también llamada desigualdad de Bell (DB).

Ya tenemos las probabilidades de una teoría de variables ocultas con resultados predeterminados; ahora es el momento de cotejar si coinciden con las de la MC.

Según la MC, la probabilidad de obtener dos “espín +” cuando medimos la partícula 1 en el eje Z y la partícula 2 en una dirección que está alejada del eje Z por un ángulo θ es:

$$P_{Z,\theta}(++) = \frac{1}{2}(\theta/2) \quad (6)$$

Siendo que el estado singlete es simétrico — y siendo que la dirección que escojamos como Z es arbitraria — esta fórmula determina la probabilidad de obtener “++”, siempre que las dos direcciones de medición tengan un ángulo θ entre ellas (esté una en el eje z o no). Es por esto que podemos usar esta fórmula general para computar las predicciones mecánico cuánticas de las tres probabilidades que aparecen en la Ec. (5).

Representemos las tres direcciones \hat{a} , \hat{b} , y \hat{c} de la siguiente manera: $\hat{b} = \hat{c}$, y con \hat{a} y \hat{c} inclinados en un ángulo θ alejado del eje z, en direcciones opuestas. Con esto tenemos, de acuerdo a la MC,

$$P_{ab}^{QM}(++) = \frac{1}{2}(\theta/2) \quad (7)$$

así como

$$P_{bc}^{QM}(++) = \frac{1}{2}(\theta/2) \quad (8)$$

Y, siendo que el ángulo entre \hat{a} y \hat{c} es 2θ , la fórmula general para $P_{ac}^{QM}(++)$ debe ser:

$$P_{ac}^{QM}(++) = \frac{1}{2}\theta. \quad (9)$$

Por todo esto, resulta un hecho matemático simple y llano que

$$\frac{1}{2}(\theta) \leq \frac{1}{2}\left(\frac{\theta}{2}\right) + \frac{1}{2}\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (10)$$

es falso para $\theta \leq \frac{\pi}{2}$. Sin embargo, la mayor violación a la ecuación de desigualdad ocurre para $\theta = \frac{\pi}{2}$.

En ese caso tenemos:

$$P_{ab}^{QM}(++) = \frac{1}{8}, \quad (11)$$

$$P_{bc}^{QM}(++) = \frac{1}{8}, \quad (12)$$

$$P_{ac}^{QM}(++) = \frac{3}{8}. \quad (13)$$

De lo que se deduce la siguiente fórmula, que implica una fragante violación a la DB por las predicciones de la MC

$$\frac{3}{8} \leq \frac{1}{8} + \frac{1}{8}. \quad (14)$$

Siendo que la MC y el tipo de teoría sugerida por Bell tienen predicciones distintas, es el momento de contrastarlas. En orden de ello, necesitaríamos producir una gran cantidad de pares de partículas de $\frac{1}{2}$ spin y conducirlas en direcciones opuestas hacia aparatos de medición Stern Gerlach que pudiesen ser orientados en tres direcciones posibles; \hat{a} , \hat{b} , y \hat{c} . Una vez realizado esto, se deben rastrear las frecuencias en que el espín \hat{a} de la partícula 1 y el espín \hat{b} de la partícula 2 dieron como resultado “arriba”, con lo que se estaría empíricamente midiendo $Pab(++)$. Lo mismo se debe hacer con $Pac(++)$ y $Pbc(++)$, para luego comparar las 3. Si el resultado corroborase (5), entonces el experimento refutaría a la MC. Si corroborase (14), la propuesta de variables ocultas locales. Pero, más importante aún: en el primer escenario se preservaría la universalidad de la localidad; el segundo, en cambio, nos tendría que obligar al menos a empezar a pensar en la plausibilidad de la existencia de acciones NL.

5.1. Experimentos cruciales

Si bien el experimento correspondiente al teorema tipo Bell ideado por Norsen (2017) es realizable, lejos se encuentra de ser ideal, ya que cuenta con varios *loopholes*.

Los *loopholes*, en física, son aquellos argumentos que tienen como objetivo invalidar una conclusión. Pongamos por caso el experimento sugerido en el apartado anterior. Supongamos la realización del mismo, y que los datos recolectados fuesen compatibles con las PES. La conclusión del mismo sería, entonces, que las correlaciones de los fenómenos entrelazados no pueden ser explicados por resultados predeterminados. El *loophole*, en este caso, buscaría algún requisito no cumplido por el experimento en pos de invalidar la anterior conclusión. Y la motivación de dicha empresa radicaría en que, de aceptarla, deberíamos aceptar la existencia de la NL (siendo que según Bell sólo podríamos evitarla mediante la incorporación en la teoría de resultados predeterminados).

El *loophole* en el que caería el experimento anterior es el de “muestreo no representativo”. El mismo sostiene que el número de correlaciones detectadas en los experimentos es muy bajo como para ser representativo al respecto de los pares de fenómenos físicos creados. Y esta es una buena objeción en este caso: como las direcciones a través de las cuales son medidos los espines de ambas partículas son

seleccionadas de forma aleatoria para cada par, entonces solo un 1/3 del tiempo lograríamos hacer uno de los tres tipos medición (ab , bc o ac) que son relevantes para (5). Por lo que 2/3 de los pares serían desperdiciados.

El primer experimento que fue considerado probatorio, debido a su sistematicidad, fue el de Aspect, Grangier y Roger (1982), el cual utilizó como base el teorema tipo Bell denominado CHSH (Clauser et al. 1969). En lugar de utilizar pares de partículas de 1/2 espín en estado singlete, utilizaron pares de fotones (resultantes de excitaciones de átomos de calcio) cuyas polarizaciones estaban entrelazadas de una forma análoga a los estados singlete. Los resultados fueron confirmatorios de las predicciones de la MC.

Si bien fueron los primeros resultados que fueron tenidos en cuenta por la comunidad científico-filosófica, el experimento sufría de dos *loopholes*: el de “ineficiencia” y el de “comunicación” (cuestión reconocida por los experimentadores).

El primero es consecuencia de que la fuente de este experimento emite pares de fotones isotrópicamente, por lo que sólo los ocasionales pares que son dirigidos correctamente a los detectores terminan, en efecto, siendo detectados. Un defensor de la localidad podría sostener que, de poder detectarse todos los pares, el resultado podría respetar la DB, salvaguardando la estructura espacio-temporal relativista. Esta hipótesis es plausible, si bien algo descabellada: tendría que haber alguna explicación de por qué las polarizaciones correlacionadas entre los pares que son dirigidos a los detectores se comportan de manera significativamente diferente que las de los pares que van en otras direcciones.

La diferencia entre este *loophole* con el de “muestreo no representativo” es muy fina. De hecho, generalmente una mala muestra es consecuencia de la ineficiencia de los detectores, cuestión que es considerada cuando no son capaces de detectar un mínimo del 67% de los fenómenos creados. Elegimos utilizar la categoría de muestreo no representativo cuando el mismo se debe no a la deficiencia de los detectores, sino a otro factor de los experimentos, como sucede en el primero analizado, donde el muestreo deficiente se debe no a la ineficiencia de los detectores, sino al contexto de su empleo.

El segundo *loophole* que padece es el de “comunicación”. El mismo sostiene que la correlación entre los resultados de medición es solo aparente, que en realidad dicha coincidencia responde a que un aparato de medición influencia al otro a tomar determinado valor, informándole de su resultado, mediante una señal transmitida dentro de los límites de la velocidad de la luz. Esto es consecuencia del tipo de detectores empleados por Aspect. Al utilizar detectores fijos, podría ser el caso de que la orientación del aparato de medición del primer fotón detectado fuese informada (mediante una señal propagada a la velocidad de la luz o menor) al segundo fotón en orden de prepararlo para correlacionar su resultado.

El primer *loophole* se resolvió con la invención de detectores más eficientes. El

segundo, empleando aparatos de medición cuyas orientaciones puedan cambiar azarosamente y a la mínima cantidad de milisegundos posibles antes del arribo de las partículas.

En realidad, muchos otros *loopholes* han sido levantados en orden de criticar los resultados experimentales y salvaguardar así el presupuesto de localidad. Sin embargo, presentar una adecuada y pormenorizada reconstrucción histórica no es el objeto del presente artículo, sino desambiguar las conclusiones del TB y de los resultados de los experimentos derivados de él. Más teniendo en cuenta que en el año 2015 se realizaron tres experimentos que los cerraron todos (Hensen et al.; Giustina et al.; Shalm et al.).

5.2. Conclusiones parciales

Según Bell, la NL de la MC es una consecuencia de las perfectas correlaciones a distancia entre sistemas físicos entrelazados y del indeterminismo. Es por esto que, postula, una teoría determinista de variables ocultas, donde los resultados de medición estén predeterminados por ellas, es la única solución posible a la hora de salvaguardar el presupuesto de localidad. Bell prueba, mediante su teorema, que las predicciones obtenidas de dicha empresa son incompatibles con las de la MC.⁵ Los experimentos realizados confirmaron las predicciones de esta última. ¿Qué conclusiones se pueden sacar de este hecho?: 1) no se puede explicar la dinámica de los estados singlete con la incorporación de variables ocultas locales; 2) la existencia de causaciones NL. Y de esto último se derivaría, analíticamente, la caída de la universalidad de la localidad. Como esto violaría la estructura espacio-temporal relativista, muchas objeciones se han levantado en orden de refutar dicha conclusión. Cotejar la plausibilidad de las que aún quedan en pie es el propósito de los próximos apartados.

6. Estrategias para salvar la localidad

6.1. Preludio necesario

Antes de hablar sobre las estrategias utilizadas para salvar la localidad, debemos hablar sobre qué las motivó. Y un necesario paso previo es hablar acerca de las consecuencias de los experimentos tipo Bell.

En orden de esto, es necesario subrayar la enorme distancia entre 1) y 2). 1) es absolutamente necesario, 2) depende de la aceptación del argumento que sostiene que la única manera de evitar la NL es mediante la predeterminación de resultados.

Como la NL es “contradictria”⁶ con la estructura espacio-temporal relativista, y como la NL es una consecuencia del indeterminismo del primer resultado de medición del par de partículas en estado singlete, Bell argumentó (como ya se ha visto en otro

apartado) que la única manera de evitar la NL es evitando el indeterminismo de los resultados. O, lo que es lo mismo, aseverando que los resultados de medición están predeterminados por alguna variable oculta local.

Estrictamente, lo que hizo Bell mediante su teorema fue agregarle a la MC la variable oculta λ (la cual predeterminaría los *outcomes*), con la que, junto a la Hipótesis 1 (si dos mediciones son realizadas a distancia tipo espacio sus respectivos aparatos no pueden influenciarse mutuamente), se pretendía obtener las PES. Como las predicciones resultantes fueron incompatibles con las de la MC (en particular, la DB), y como se refutaron experimentalmente, la conclusión lógica de la aceptación de los argumentos del TB es la existencia de la NL. Lisa y llanamente, porque si aceptamos que la única manera de evitar la NL es introduciendo valores predeterminados, y esta empresa se mostró inconducente... En fin, 2) se sigue de esto, y el objetivo de este apartado es sistematizar los intentos de evitarlo.

6.2. Estrategias

Hay tres tipos de estrategias para evitar la NL: 6.2.1) sostener que la refutación de la DB no refuta la localidad, sino otra/s premisas, 6.2.2) desestimar los experimentos por no cumplir ciertos factores, e 6.2.3) intentar explicar las PES mediante explicaciones alternativas.

6.2.1. Refutación de premisas

Siendo que la DB fue refutada experimentalmente, y que se sigue de las ecuaciones de la MC, de λ y de la Hipótesis 1, necesariamente las premisas conjuntadas deben ser falsas. Lo que los defensores de la localidad hacen, por tanto, es señalar que la premisa refutada es otra que la Hipótesis 1 (lo contrario sería equivalente a afirmar la NL). Como no es pragmática la refutación de las ecuaciones de la MC,⁷ el único candidato restante sería λ . Se ha dicho que detrás de λ , o sumada a las premisas mencionadas, se encontraba el realismo, clasicalidad, las definiciones contrafácticas y muchas otras cosas más. Este es el camino más transitado. El problema de dicho camino es que cuenta con obstáculos insalvables.

El primero, y más evidente, es que de una conjunción falsa no es posible individualizar cual es el responsable de ello (podría ser una premisa, más de una o todas). Esto visto desde la lógica. El segundo, y ya mencionado, es que no se tiene en cuenta la función de λ en el teorema: como λ fue propuesto como la única forma posible de sortear la NL, rechazar λ (en cualquiera de sus atribuciones) implica, necesariamente, aceptar la NL.

Este tipo de estrategia, además de resultar inconducente, deja muchas preguntas sin responder. Concedámosles una victoria pírrica y aceptemos que lo que refutan los

experimentos tipo Bell es el realismo (olvidando que λ no es más que una variable matemática agregada a las ecuaciones en pos de obtener predicciones explicables localmente). Dejemos de lado qué significaría realismo para los detentores de esta estrategia (y cómo su rechazo conllevaría el de la NL) y enfoquémonos en lo que esta estrategia deja en pie: las PES. El conservar esto último, junto al indeterminismo de la MC, nos lleva nuevamente a la NL! ¡Y esto sucede hasta operacionalmente! Supongamos, a la Bohr, que la MC es una teoría probabilística cuyo objetivo no es hablar sobre la realidad física sino meramente predecir outcomes. Esto, naturalmente, dificulta hablar acerca de causación entre entidades. Hablemos, entonces, acerca de probabilidades. Imaginemos, nuevamente, dos partículas en estado singlete de $\frac{1}{2}$ espín cada una y dos aparatos de medición espacialmente separados. Antes de llegar a los detectores, existe una probabilidad de 50/50 de obtener espín arriba o espín abajo en cada aparato Stern Gerlach. El asunto es que, cuando la primera llega a uno, y se determina en base a esa probabilidad, la probabilidad del otro 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 si aquí no aceptamos la existencia de algún tipo de causación, deberíamos empezar a preguntarnos acerca de la existencia de genios malignos operando en el mundo. Lo cual, si bien a priori podría parecer descabellado, es una de las estrategias que se han utilizado.

Resulta, además, bastante paradójica la actitud de quienes rechazan la NL mediante esta estrategia. Recordemos que sus detractores sostienen que lo refutado por el TB, debido a los experimentos realizados, es el realismo. Sólo una persona profundamente antirrealista podría adjudicarle el mote de realista a algo que no lo es, sólo para desacreditarlo. Y aventuro que, detrás de la aseveración de que lo que se descarta es el realismo, se encuentra el credo operacionalista de la ortodoxia en MC que sostiene que no hay una imagen del mundo microscópico: la MC como sólo siendo un dispositivo útil de predicción. El problema de esta actitud es que encierra un fragrante oxímoron. Y es que criticar un fenómeno físico, corroborado experimentalmente, únicamente sobre la base de mantener a toda costa la estructura espacio-temporal relativista, encierra un dogmatismo sobre esta última que ni el realista más recalcitrante sería capaz de sostener;

El cálculo pareciera indicar que uno estuviese dispuesto a pagar cualquier precio— aún renunciar a las pretensiones de describir con precisión el mundo— en orden de preservar la teoría de la Relatividad. ¡Pero la única postura capaz de dar cuenta de este excesivo apego a la Relatividad es mediante una realista! Estos físicos están tan seguros de que la Relatividad es la última palabra en la estructura espacio-temporal que están dispuestos a renunciar a cualquier representación coherente de las entidades que habitan en él. (Maudlin 1996, p.309)

6.2.2. Loopholes

Si bien carece de sentido hablar acerca de objeciones que ya no se pueden esgrimir, consideramos que delimitar el concepto de loophole puede llegar a ser útil en más de una manera. Esto se debe, en primer lugar, a que su aplicación en física no está regimentado, sumado a que dicha acción puede llegar a proveernos una buena perspectiva sobre la actitud de quienes lo emplean.

Según el diccionario de Cambridge, loophole significa: algo que se ha dejado de lado en una ley o contrato, que habilita legalmente a no obedecerlo. Traduciéndolo a la práctica científica, sería: requisito no cumplido por los experimentos, que habilita a rechazar sus conclusiones. Hay una intencionalidad en el concepto, que va más allá de su definiens (en el cual de todas maneras se intuye): buscar una excusa para evitar algo. Y lo que se quiso hacer con los loopholes es justamente eso; no me conviene aceptar la conclusión de los experimentos, entonces busco el argumento que me sirva en orden de evitarla.⁸

Los loopholes se dividen en dos partes: medios y fin. Lo más importante, y lo que motiva su constitución, es el fin de evitar algo; el medio es contingente y se haya en función de lo anterior. Lo que se quiere evitar con ellos es la NL, lo cual responde al dogmatismo acerca de la estructura espacio-temporal relativista. Hay cierta necedad en algunos loopholes, pero la más evidente es la correspondiente al único que queda en pie: el superdeterminismo (Andreoletti & Vervoort 2022; Baas & Le Bihan 2023).

El superdeterminismo es, en pocas palabras, la propuesta que sostiene que todo en el universo (incluyendo las elecciones de medición en experimentos) está completamente determinado por condiciones previas, desde el origen del mismo. Desde esta postura no existe el libre albedrío en ningún sentido operativo, así como tampoco eventos verdaderamente aleatorios.

Esta hipótesis viola el presupuesto fundamental de la teoría de la probabilidad denominado independencia estadística (dos eventos son estadísticamente independientes si la probabilidad de uno no cambia por la ocurrencia o no del otro; en MC significa que la configuración de los aparatos de medición no está determinada, al momento de su empleo, por variables de los fenómenos medidos). ¿Qué implica entonces su negación? Que cada vez que uno pretende estar configurando libremente un eje de medición (así sea tirando una moneda al aire, así sea por un algoritmo computacional), existen fuerzas que lo impiden. El superdeterminismo supone un holismo donde todo está absolutamente correlacionado con todo, desde los inicios mismos del universo. Es por esto que las configuraciones de los aparatos de medición no pueden elegirse libremente, sino que indefectiblemente van a estar determinadas por los fenómenos a medir.

El superdeterminismo es una hipótesis (incontrastable y lógicamente irrefutable) que sostiene que las correlaciones detectadas entre los resultados de medición de

los estados singlete de absolutamente todos los experimentos tipo Bell realizados no conforman una muestra representativa de los fenómenos involucrados.⁹ Anula la evidencia empírica que soporta la NL. El problema es que también anula la evidencia empírica de la teoría de la relatividad, de la MC en su totalidad, así como la de todos los experimentos pasados, presentes y futuros. Es por esto que, por cuestiones pragmáticas, el único modelo superdeterminista que vamos a tener en cuenta, en orden de resguardar la práctica científica, será el que alegue que la independencia estadística sólo es anulada en experimentos tipo Bell. Modelo que a continuación será desplegado.

Dicha propuesta corresponde a Hossenfelder y Palmer (2020), mediante la introducción de su teoría de conjuntos invariantes. La misma es una teoría determinista basada en el supuesto de que las leyes de la física se derivan primitivamente de la geometría de las trayectorias de los conjuntos fractales I_U en el espacio de estados. Puede utilizarse, según los autores, como la base de una teoría determinista de la física cuántica contrafácticamente incompleta, razón por la cual es capaz de violar el presupuesto de independencia estadística y, por ende, evitar la NL.

Los autores argumentan que los estados de la realidad física (el espacio-tiempo que comprende nuestro universo y los procesos que ocurren en él) son aquellos y sólo aquellos pertenecientes a I_U ; otros estados en el espacio euclíadiano, en el cual I_U está embebido, no corresponden a estados de la realidad física. La evolución dinámica mapea puntos de I_U a otros puntos de I_U desde donde I_U es invariante bajo las leyes dinámicas de evolución. En dicha teoría, el elemento básico de I_U es una hélice fractal donde cada trayectoria es asimismo una hélice de trayectorias de escalas finas.

La relación con la MC es mediante las propiedades estadísticas de las hélices, las cuales pueden ser representadas por vectores complejos de Hilbert y productos tensoriales, donde las amplitudes cuadráticas y las fases complejas de los vectores de Hilbert son necesariamente descriptos por números racionales. Los autores argumentan que, siendo que su teoría está formulada en estados complejos de Hilbert, la misma viola la DB exactamente como la MC. Y esto lo hace porque viola el presupuesto de independencia estadística, argumentan. Esto sucede porque las brechas fractales de I_U corresponden a estados del mundo asociados con ciertas configuraciones de medición contrafácticas, que por construcción no son ónticas. Entonces, de la indefinición matemática de ciertos contrafácticos putativos, se sigue la violación de independencia estadística, al menos en esos casos.

¿Cómo refutaría la teoría propuesta la NL? Esto sucede, sostienen los autores, porque la teoría de los fractales impide la ontología espacio-temporal de los contrafácticos empleados en el TB (porque representan, según ellos, puntos que están asociados con estados de Hilbert donde, o sus amplitudes cuadráticas, o sus fases complejas, no pueden ser descriptas con números racionales). De esta manera, se violaría el presupuesto de independencia estadística, el cual es un presupuesto me-

todológico del TB (y de absolutamente todo experimento científico que pueda apreciarse de tal). Pero, la pregunta persiste: ¿esto, refutaría la NL? De ninguna manera. Si el TB involucrase definiciones contrafácticas, y ellas fuesen no ónticas, esto no implicaría otra cosa que la inconsistencia matemática y la inadecuación empírica del TB por lo que, lo que en realidad se estaría haciendo, es volver trivial la DB. Esto no lo reconocen en el artículo, sino en el debate sobre NL que Tim Palmer tiene con Tim Maudlin en el canal de YouTube de Curt Jaumungal:

Si tu teoría dice que no, que esta variación que has realizado a la configuración del aparato de medición, dejando λ fijo, esta configuración hipotética que en realidad no hiciste, pero que quizás hubieses hecho, viola las condiciones de tu teoría, entonces no puedes derivar la desigualdad de Bell, y no lo puedes hacer porque violaste esto, porque violaste independencia estadística. (Theories of Everything with Curt Jaimungal 2023, 1h22m20s)

En síntesis, lo que parecía la mejor refutación de la NL no pasó a ser más que un infructuoso, y mal fundamentado, movimiento *ad hoc* contra ella. Si todo lo que “consigue” Palmer, en realidad, es anular el TB, eso no le hace mella a la NL. Cuando mucho, estaría refutando formalmente lo que ya anteriormente habían refutado los experimentos. Y se emplearon comillas porque para conseguir lo que pretende, en el TB debiesen haber definiciones contrafácticas...

¿Por qué Palmer argumenta que las definiciones contrafácticas son una premisa del TB? Porque interpreta a P_λ como representando tal función (para determinar si esto es así, revisar

6.2.3. Explicaciones alternativas a la NL

Este tipo de estrategia no consiste en interpretar mal el TB (a) o en rechazar los resultados experimentales (b): consiste en rechazar que la única manera de evitar la interacción superlumínica entre detectores es mediante la predeterminación de sus resultados.

6.2.3.1 Volver al futuro

La explicación alternativa a la NL que primero vamos a desplegar es la denominada como retrocausalidad (Costa de Beauregard 1976; Cramer 1980; Dowe 1997; Miller 1996; Price 1997; Sutherland 1983; Wharton 2007). La misma sostiene que las propiedades de un sistema pueden ser influenciadas por eventos futuros. Lo que vamos a analizar a continuación es el modelo retrocausal propuesto por Corry (2015), el cual pretende explicar las predicciones acerca de los sistemas en estados singlete desde sus supuestos.

Corry arranca su propuesta resumiendo las predicciones antedichas en dos categorías:

Hecho 1: Siempre que los detectores midan en el mismo eje, sus respectivos resultados serán opuestos.

Hecho 2: Cuando los detectores midan en ejes distintos, sus respectivos resultados serán opuestos, aproximadamente, un 25 % de las veces. (p.2 y p.3)

En orden de recuperar estos hechos, Corry postula las siguientes restricciones:

Restricción del entrelazamiento retrocausal: Las interacciones de entrelazamiento deben satisfacer las siguientes condiciones:

1. Si $s_1 = s_2 = A$ entonces $a_1 = -a_2$.
2. Si $s_1 = s_2 = B$ entonces $b_1 = -b_2$.
3. Si $s_1 = s_2 = C$ entonces $c_1 = -c_2$.

Restricción segunda del entrelazamiento retrocausal: Las interacciones de entrelazamiento deben satisfacer las siguientes condiciones:

1. Si $s_1 = A$ y $s_2 = B$ entonces existe una ,25 probabilidad de que $a_1 = -b_2$.
2. Si $s_1 = A$ y $s_2 = C$ entonces existe una ,25 probabilidad de que $a_1 = -c_2$.
3. Si $s_1 = B$ y $s_2 = A$ entonces existe una ,25 probabilidad de que $b_1 = -a_2$.
4. Si $s_1 = B$ y $s_2 = C$ entonces existe una ,25 probabilidad de que $b_1 = -c_2$.
5. Si $s_1 = C$ y $s_2 = A$ entonces existe una ,25 probabilidad de que $c_1 = -a_2$.
6. Si $s_1 = C$ y $s_2 = B$ entonces existe una ,25 probabilidad de que $c_1 = -b_2$. (p.4 y 5)

(S_1 y S_2 refieren a dos detectores separados espacialmente. A , B y C a sus posibles ejes de medición. a_1 y a_2 a los posibles valores del eje A . b_1 y b_2 a los de B y c_1 y c_2 a los de C)

El modelo propuesto postula que la correlación del Hecho 1 no responde a una interacción entre los detectores, sino a una retrocausalidad. ¿Cómo funcionaría esto?;

La interacción de entrelazamiento deberá necesitar “saber” qué configuración de medición ha sido escogida para poder asegurarse de que las variables correctas resulten anticorrelacionadas. La forma más sencilla de darle acceso a esta información, para mantener la localidad, es adhiriéndole una variable representando la configuración del aparato de medición en cada camino interno. (p.4)

Dejemos de lado por un momento la atribución de conciencia no a una entidad microscópica (lo cual sería mucho), sino a una de sus propiedades (pero no tanto como esto) e intentemos develar de qué va su propuesta.

Dos partículas entrelazadas salen de la fuente y recorren un trecho juntas hasta que se separan en caminos internos hacia sus respectivos aparatos de medición: S_1 y S_2 . Lo que sostiene Corry es que, antes de llegar a ellos, en los caminos internos, las partículas ya “saben” en qué eje serán medidas, por lo que prepararán las variables correspondientes a cada uno, en pos de correlacionarse. ¿Cómo funciona esto? El camino interno de la partícula 1, postula Corry, tiene las siguientes variables: s_1 , a_1 , b_1 y c_1 . Teniendo el de la partícula 2 las siguientes: s_2 , a_2 , b_2 y c_2 . Supongamos que la partícula 1 es la que llega primero. Y recordemos, a su vez, que la medición en S_1 se hace libremente y que puede ser realizada en tres distintas configuraciones (A , B y C). El evento que determina la configuración de medición de S_1 (en A , supongamos) cuestión que se realiza en el último microsegundo antes de la llegada de la partícula 1, tiene influencia causal sobre el evento que lo precedió, es decir, el camino interno a su realización. Desde el futuro, la elección de la configuración del aparato de medición, S_1 determina la variable de su camino interno previo, s_1 , la cual determina a su vez que de entre las tres variables potenciales (a_1 , b_1 , y c_1) se efectivice la primera. Lo mismo sucede con la partícula 2. Una vez determinadas ambas propiedades, entonces la primera restricción provoca que ambos resultados se encuentren anticorrelacionados. Invito al lector o lectora a que se tome unos minutos para deducir cuáles son los problemas que conlleva esta interpretación.

El primero de ellos es que la correlación se da por postulación, no por una explicación mecánico causal (recordemos que la propuesta se llama retrocausalidad). Repasemos: en el futuro, los medidores S_1 y S_2 se configuran en el eje A , lo que determina que ambas partículas vayan a esos mismos detectores con las variables correspondientes (a_1 y a_2). Si todo lo que esta interpretación nos dice es que S_1 afecta s_1 en su propio camino interno, igual que S_2 a s_2 en el suyo; ¿dónde o cuando se produce la interacción entre s_1 y s_2 para que se anticorrelacionen? ¡Eso sólo sucede por la restricción postulada de la dinámica de los sistemas!

La interpretación carece, notablemente, de economía; ¿cuál es la necesidad de postular tantas variables? Supongamos que la información de la configuración de los aparatos de medición S_1 y S_2 cause desde el futuro que las partículas, antes de separarse e ir hacia ellos, se predispongan a correlacionarse o anticorrelacionarse en base a la información obtenida; ¿no se explicaría mejor todo y con muchos menos elementos?

Hay una crítica que el lector no podría haber hecho debido a una omisión consciente en orden de darle plausibilidad a la exposición; “Tiene perfecto sentido interpretar las observaciones O_1 y O_2 como mediciones de propiedades preexistentes y determinadas de los sistemas” (p.5). Y con esto ahora sí que se derrumba todo. ¿Cuál es el punto de plantear una ridícula causación de los aparatos de medición desde el futuro si las propiedades de los sistemas entrelazados que deberían afectar ya se encuentran predeterminadas? Causar, por definición, implica generar efectos.

¿Qué efectos puede generar en algo que ya está determinado?

Dos opciones posibles podrían salvar esta propuesta, una indeterminista y otra determinista. En la primera, se tendría que reemplazar la preexistencia de las propiedades de los sistemas físicos y aceptar el rol causal de los aparatos de medición, así como el indeterminismo. Dos partículas entrelazadas salen de la fuente. Antes de separarse, o en un camino interno compartido, la partícula que va a llegar primero se predispondrá a determinarse en función del eje de su medición futura. La otra, contando con dicha información, se correlacionará o anticorrelacionará, siguiendo la naturaleza de los estados singlete, conforme al eje de medición con el que se encuentre en el futuro.

La segunda implica hacer lo mismo que Bell, pero agregándole a las ecuaciones una que implique la posibilidad de causaciones desde el futuro. Y de ahí corroborar si las predicciones obtenidas mediante la teoría de la probabilidad son compatibles con las predicciones de la MC al respecto de los estados singlete.

6.2.3.2 Agujeros de gusano

La otra explicación alternativa a la NL que vamos a analizar es la postulación de agujeros de gusano. Esta propuesta aventura la existencia de un túnel que conecta los detectores, a través de sus dos bocas situadas convenientemente a sus costados, de forma en que cuando el primer fenómeno físico llega a un detector el mismo envía su configuración y resultado al otro, a velocidad sublumínica, en orden de correlacionarse;

Supongamos que las partículas se encuentren en la vecindad de las bocas del agujero de gusano... Si ahora la partícula 1 interactuase con un aparato Stern-Gerlach, el impulso resultante debería generar una alteración que se propagaría sublumínicamente al segundo aparato a través del agujero de gusano. (Holland 1993, p.521).

Esta posibilidad, señala el autor, está plagada de problemas. En primer lugar, significaría la caída de un presupuesto mucho más pesado que la localidad; implicaría un absoluto cambio de paradigma en la estructura espacio-temporal:

Uno de los presupuestos tácitos de la prueba es que los sistemas que parecen estar espacialmente separados realmente lo están. Dada la presuposición convencional acerca de la topología de conexiones simples de la topología del espacio Euclíadiano... esta es una presuposición razonable. Sin embargo, si abandonamos el requerimiento de conexión simple y admitimos conexiones múltiples en la topología espacio-temporal, la situación al respecto de lo que implica el teorema de Bell podría cambiar. (p.521)

Ergo, la aceptación de los agujeros de gusano implicaría la caída del espacio euclíadiano (o, más específicamente, el espacio de Minkowski). Y no sólo eso, sino que dicho fenómeno resulta absolutamente incompatible con la MC.

Los agujeros de gusano son un resultado formal, semi-interpretado, de las soluciones a las ecuaciones de Einstein. Pertenece, además, a la relatividad general. Cualquier vínculo de la relatividad general con la MC requiere de tener alguna idea de cómo reconciliar la gravedad con la MC. Por lo tanto, hasta que esta relación sea investigada, los agujeros de gusano no pueden conformar una explicación plausible.

7. Conclusión

Las conclusiones del presente trabajo pueden resumirse en el siguiente argumento. Puede juzgarse de redundante, pero 60 años de incomprensiones lo vuelven necesario:

El indeterminismo de los resultados, junto a las PES a distancia tipo espacio, implican NL.

Sólo es posible evitar la NL anulando el indeterminismo de la MC.

Mediante la predeterminación de los resultados (-I) pueden recuperarse las PES y evitar la NL.

Las predicciones obtenidas mediante predeterminación son distintas de PES.

O las predicciones anteriores son empíricamente adecuadas y se salvaguarda la localidad o lo son las PES y se corrobora la NL.

Se corrobora PES a distancias tipo espacio.

La NL existe.

A pesar de este argumento, que parece inexorable, el rechazo a la NL, expresado en las diversas estrategias analizadas, no ha cesado. Y ello es debido a que la NL es inconsistente con la relatividad especial, la cual prohíbe efectos instantáneos a distancia. Además, la NL (interpretada de cierta manera) podría ser incompatible con la invariancia de Lorentz, característica central de los fenómenos relativistas.

Sin embargo, la incompatibilidad de la NL con la relatividad debería ser un argumento en contra de la relatividad, en lugar de un argumento contra la NL: todos los experimentos que se realizaron en orden de refutar a la NL resultaron, en cambio, confirmatorios. De hecho, se trata de un fenómeno central en la teoría de la información, en la criptografía, y en la computación cuántica; ¿cómo se le puede negar el estatus ontológico a algo que es comprendido y empleado consistentemente en diversas áreas del conocimiento? Si la NL requiere de algún tipo de marco de referencia predilecto para dar cuenta de la simultaneidad de ciertos fenómenos, entonces se debería al menos empezar a pensarse en la posibilidad de algún tipo de foliación distintiva en la estructura espacio temporal (tal como sugieren Cushing 1994; Maudlin

1996). Tal como hacen Dürr et al. (1999), que crearon un modelo NL que es Lorentz invariante, al postular una foliación distintiva como un *beable*¹⁰ de la teoría. Y tampoco la restricción de velocidades de la relatividad debería significar un escollo mayor, ya que lo único que esta teoría explícitamente prohíbe es velocidades superlumínicas que sean capaces de transmitir información (capaces de emplearse para comunicación), no correlaciones NL como las analizadas.¹¹

Además, hay un hecho histórico que no debe ser soslayado. La relatividad especial y general fueron construidas por Einstein teniendo en cuenta las teorías que lo antecedieron. La relatividad especial fue desarrollada en reflejo a la electrodinámica clásica de Maxwell, la cual es una teoría local (que, por definición, no permite NL). La relatividad general fue desarrollada en base a ello y al objetivo de lograr una buena aproximación al fenómeno gravitacional newtoniano. Y se trata, también, de una teoría local. Es argumentable, quizás, que las restricciones impuestas a su sistema sean más reflejo del paradigma científico de su momento que restricciones intrínsecas de la naturaleza. Es una interesante ucronía plantear cómo Einstein hubiese construido sus teorías de haber tenido a mano los resultados de los experimentos tipo Bell.

Concluimos, por tanto, que en vez de desperdiciarse tiempo y neuronas en intentar refutar la NL, dicho esfuerzo debería redirigirse a la exploración tanto de su ontología como de las consecuencias de su aceptación, tanto en el plano teórico como en la estructura espacio-temporal.

El descubrimiento de la NL abrió las puertas a un mundo nuevo; es nuestro imperativo deber explorarlo.

Referencias

- Andreletti, G.; Vervoort, L. 2022. Superdeterminism: a reappraisal. *Synthese* **200**(361): 1–20.
- 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.
- Baas, A.; Le Bihan, B. 2023. What does the world look like according to superdeterminism? *British Journal for the Philosophy of Science* **74**(3): 555–572.
- Bacciagaluppi, G.; Valentini, A. 2009. *Quantum Theory at the Crossroads: Reconsidering the 1927 Solvay Conference*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Bell, J. 1964. On the Einstein Podolsky Rosen paradox. *Physics* **1**: 195–200.
- Bell, J. 1986. Beables for quantum field theory. *Phys. Rep.* **137**: 49–54.
- Bohm, D. 1951. *Quantum Theory*. New York: Prentice-Hall.
- Bohm, D.; Aharonov, Y. 1957. Discussion of experimental proof for the paradox of Einstein, Rosen, and Podolsky. *Physical Review* **108**(4): 1070–1076.
- Clauser, J.; Horne, M.; Shimony, A.; Holt, R. 1969. Proposed experiment to test local hidden-variable theories. *Phys. Rev. Lett.* **23**(15): 880–884.

- Corry, R. 2015. Retrocausal models for EPR. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* **49**: 1–9.
- Costa de Beauregard, O. 1976. Time symmetry and interpretation of quantum mechanics. *Foundations of Physics* **6**(5): 539–559.
- Cramer, J. 1980. Generalized absorber theory and the Einstein–Podolsky–Rosen paradox. *Physical Review D* **22**: 362–376.
- Cushing, J. 1994. *Quantum Mechanics: Historical Contingency and the Copenhagen Hegemony*. Chicago: The University of Chicago Press.
- Dowe, P. 1997. A defense of backwards intime causation models in quantum mechanics. *Synthese* **112**(2): 233–246.
- Dürr, D.; Goldstein, S.; Münch-Berndl, K.; Zanghí, N. 1999. Hypersurface Bohm–Dirac models. *Physical Review A* **60**: 2729–2736.
- Einstei, A.; Podolsky, B.; Rosen, N. 1935. Can quantum mechanical description of reality be considered complete?. *Physical Review* **47**: 777–80.
- Giustina, M.; Versteegh, M.; Wengerowsky, S.; Handsteiner, J.; Hochrainer, 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.; Ursin, R.; Wittmann, B.; Zeilinger, A. 2015. Significant-Loophole-Free Test of Bell’s Theorem with Entangled Photons. *Physical Review Letters* **115**(25): 250401.
- 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.
- Holland, P. 1993. *The quantum theory of motion: an account of the De Broglie-Bohm causal interpretation of quantum mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Hossenfelder, S.; Palmer, T. 2020. Rethinking Superdeterminism. *Frontiers in Physics* **8**: 139.
- Jaimungal, C. 2023. Theories of Everything with Curt Jaimungal, 25/07/2023. *Tim Maudlin y Palmer: Teoría fractal, No-Localidad y Bell*. Video. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=883R3JlZHxE&t=5691s>
- Maudlin, T. 1996. Space-time in the quantum world. In: J. Cushing; A. Fine; S. Goldstein (ed.), *Bohmian Mechanics and Quantum Theory: An Appraisal*. Boston Studies in the Philosophy of Science, vol.184, pp.285–307. Dordrecht: Springer.
- Miller, D. 1996. Realism and time symmetry in quantum mechanics. *Physics Letters A* **222**(1–2): 31–36.
- Norsen, T. 2017. *Foundations of Quantum Mechanics: An Exploration of the Physical Meaning of Quantum Theory*. Cham: Springer.
- Price, H. 1997. *Time’s arrow and Archimedes’ point: New directions for the physics of time*. Oxford: Oxford University Press.
- 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.
- Sutherland, R. 1983. Bell’s theorem and backwards-in-time causality. *International Journal of Theoretical Physics* **22**(4): 377–384.

Wharton, K. 2007. Time-symmetric quantum mechanics. *Foundations of Physics* 37(1): 159–168.

Notas

¹Bell fue el primero en suplementar a la MC con variables ocultas con el objetivo de evitar causaciones inmediatas. El primero que estrictamente suplementó a la MC con variables ocultas fue de Broglie, mediante la introducción de su teoría de la Onda Piloto en el quinto congreso de Solvay (Bacciagaluppi & Valentini 2009, p.341)

²Esto fue sugerido originalmente por Bohm y Aharonov (1957, p.1071).

³Se utiliza el término “fenómeno” ya que es capaz de abarcar tanto el caso de que la interacción sea entre los aparatos de medición como entre los *outcomes*.

⁴Esto es sugerido, entre otros, por Bell (1964, p.199), Einstein (Bohm 1957, p.1071) y Holland (1993, p.483).

⁵El TB prueba que toda teoría de variables ocultas local es empíricamente inadecuada al respecto de la dinámica de los fenómenos singlete.

⁶El significado de las comillas se comprenderá en la conclusión.

⁷Porque la hipótesis de su inadecuación empírica sería contraproducente: derrumbaría absolutamente todo el castillo cuántico. Castillo del cual, hasta su ladrillo más anti-intuitivo (las PES), fue corroborado experimentalmente.

⁸Para ser justos, es cierto que los *loopholes* pueden ser funcionales al refinamiento de los experimentos. Pero también lo es que el concepto prácticamente se inventó para refutar las conclusiones de los experimentos tipo Bell y que conforme algunos se iban solucionado iban formulándose otros.

⁹E implica la existencia de una conspiración. Partiendo de que los resultados experimentales fueron manipulados por la naturaleza, tenemos dos opciones. Una es que nos quiera engañar, simulando mediante resultados fraguados una NL en realidad inexistente. La segunda es que nos quiera guiar por el camino correcto, realizando nuevamente lo anterior, pero con el fin antedicho. El problema es que esta última opción es autocontradicторia; si existiese la NL, fraguar los resultados experimentales nos impediría corroborarlos. Ergo, si el superdeterminismo tuviese razón, la naturaleza sería similar al genio maligno cartesiano. Disculpas desde ya por la injustificada atribución de conciencia y voluntad a la naturaleza, pero resultan, no obstante, paradojas interesantes.

¹⁰Los *beables*, según Bell (1986, p.50), son aquellos elementos de las teorías que podrían corresponder a elementos de la realidad, a cosas que existen; corresponden a elementos cuya existencia no depende de ningún tipo de observación.

¹¹Para que la NL pudiese utilizarse para transmitir información el resultado del primer detector debería ser determinista, en orden de poder manipularse antes de disparar las partículas de la fuente. Como dicho resultado es de carácter indeterminista (no se puede conocer de antemano), es imposible utilizarlo para enviar información al segundo detector/experimentador.

Agradecimientos

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a los Dres. Bruno Borge y Cristian López, cuya inestimable ayuda, consejo y acompañamiento fueron esenciales en la investigación aquí vertida. Debo reconocer, a su vez, al Dr. Alejandro Cassini, quien resultó fundamental en la elección del área de estudio, y que hoy en día continúa asesorándome desde sus conocimientos insondables.