

RELEVANCIA CAUSAL DE LA MEDIDA EN
EXPERIMENTOS EPR:
CONSIDERACIONES ONTOLÓGICAS*

*Causal Relevance of Measurement Operations in EPR:
Ontological Implications*

Iñaki SAN PEDRO
Universidad Complutense de Madrid

BIBLID [(0213-356)12,2010,19-34]

Fecha de aceptación definitiva: 27 de abril de 2009

RESUMEN

Se discuten en este trabajo las implicaciones ontológicas de un posible modelo de causa común para las correlaciones EPR, cuya característica principal radica en el hecho de que las operaciones de medida en *ambas* alas del experimento son explícitamente relevantes (desde un punto de vista causal) para las causas comunes. Gracias precisamente a este tipo de dependencias entre causas comunes y operaciones de medida, el modelo sorteja las implicaciones del teorema de Bell (a menudo fatales para las explicaciones de las correlaciones EPR en términos de causas comunes). El modelo, sin embargo, resulta patentemente no local, lo que se refleja bien en una ontología en que las causas comunes se conciben como eventos deslocalizados espacio-temporalmente o, en caso contrario, en la existencia de interacciones causales no locales.

Palabras clave: Causas comunes, correlaciones EPR, no-localidad, localización espacio-temporal.

* Investigación financiada por el proyecto FFI2008-06418-C01-03 del Ministerio de Ciencia e Innovación.

ABSTRACT

This paper addresses the ontological implications of a possible common cause model for the EPR correlations. The main characteristic feature of the model has to do with the causal relevance, which is made explicit, of measurement operations for the postulated common causes, and hence as regards the final outcomes as well. These kind of dependences allow for the model to avoid the charge of Bell's theorem, which is commonly taken to rule out explanations of the EPR correlations in terms of common causes. The model displays however a certain non-locality which suggests an ontological revision of the events involved. Two are the interpretations proposed for the postulated common causes. On the one hand, common causes may be viewed as non-localised events which operate causally in a local manner. Alternatively, the common cause events may be taken to be well defined localised events in space-time with non-local causal powers.

Key words: Common causes, EPR correlations, non-locality, space-time localization.

1. INTRODUCCIÓN

A pesar de la extensa literatura disponible sobre la validez del Principio de Causa Común de Reichenbach (PCCR) en el contexto de las correlaciones EPR, el que éstas admitan o no explicaciones en términos de causas comunes sigue siendo una pregunta abierta. Pregunta de gran interés filosófico, por otra parte, ya que una respuesta adecuada a ella contribuiría a esclarecer el estatus de las afirmaciones causales en la mecánica cuántica.

La postura más ampliamente aceptada defiende que este tipo de explicación debe ser rechazada en base, principalmente, a las implicaciones del teorema de Bell. Los argumentos más habituales en este sentido tratan las causas comunes a todos los efectos como variables ocultas, sobre las cuales se imponen ciertas restricciones, normalmente motivadas por observaciones e intuiciones de carácter físico, como pueden ser condiciones que se refieren al orden temporal de las secuencias causales, o consideraciones relativas a la localidad. Esto resulta en alguna versión de las desigualdades de Bell. La fuerza y validez de este tipo de argumento radica en la plausibilidad física de las restricciones impuestas.

Una de estas condiciones, que puede encontrarse en la literatura reciente bajo el nombre de condición de «no-conspiración»¹, establece la independencia

1. Traducida literalmente del término *no-conspiracy*. Ver por ejemplo SZABÓ (2000, 2008) o GRAßHOFF et al. (2005).

estadística entre la causa común postulada por el PCCR y las operaciones de medida en cada una de las alas del experimento EPR. En la interpretación más habitual, la violación de dicha independencia –es decir, la existencia de influencias por parte de las causas comunes sobre las operaciones de medida o viceversa– se considera inaceptable por indicativa de un cierto comportamiento conspiratorio (en virtud del cual las causas comunes determinarían, o influirían al menos, en las decisiones del experimentador en relación a las operaciones de medida a efectuar en cada caso). Esta interpretación presupone, aunque de forma implícita, que las causas comunes son anteriores (temporalmente) a las operaciones de medición.

La lectura estándar de la condición de «no-conspiración» es, en cualquier caso, cuestionable desde diversos puntos de vista. Una posibilidad de rebatirla pasa por suponer que las causas comunes ocurrieran (o tuvieran lugar) en un momento posterior –*inmediatamente* posterior, quizá– a las operaciones de medida. En ese caso, y considerando las mediciones como causalmente relevantes, la violación de la independencia estadística requerida por la condición de «no-conspiración» no parecería tener en absoluto tintes conspiratorios. Al contrario, esta opción resulta conceptualmente bastante natural. Las causas comunes así postuladas apuntan pues a la posibilidad de un modelo causal para las correlaciones EPR libre de las implicaciones del teorema de Bell². Este tipo de modelo tiene sin embargo una serie de implicaciones, tanto en relación al concepto de localidad como a nivel ontológico, que necesitan ser analizadas.

Este trabajo se centra precisamente en evaluar dichas implicaciones ontológicas. Se proponen, en concreto, dos interpretaciones alternativas. Una primera en que las causas comunes del modelo se tienen por eventos bien definidos y localizados espacio-temporalmente. En tal caso, la influencia causal de los eventos «causas comunes» sobre los resultados del experimento debe ser necesariamente no local. De manera alternativa, es posible concebir las causas comunes propuestas como eventos no localizados que, al estar extendidos en el espacio tiempo, son perfectamente capaces de operar causalmente de una forma completamente local, como es estándar.

La estructura del trabajo es como sigue: en la Sección 2 se presentan las ideas básicas en torno al experimento EPR y al concepto de causa común. La Sección 3 recoge las principales características del modelo de causa común para EPR arriba mencionado. Las implicaciones ontológicas del modelo se discuten detalladamente en las Secciones 4 y 5, que recogen respectivamente las dos posibles interpretaciones mencionadas.

2. Cf. SAN PEDRO (*forthcoming*).

2. CORRELACIONES EPR Y CAUSAS COMUNES

Einstein, Podolsky and Rosen (EPR en lo que sigue) proponen en 1935³ un experimento ideal dirigido a poner en tela de juicio la completitud de la aún joven mecánica cuántica como descripción de la realidad física. No es necesario discutir en este trabajo los detalles en cuanto al verdadero propósito e implicaciones del argumento EPR. Digamos tan sólo que las cuestiones que el experimento EPR plantea en relación a los fundamentos de la mecánica cuántica han resultado tener un alcance mayor que lo que, por diversas razones, el argumento original sugiere⁴. Bastará pues, por ahora, con describir a grandes rasgos los rudimentos del experimento.

En la versión de Bohm y Anahorov dos electrones entrelazados, que se encuentran en el estado *singlete* Ψ_s , son emitidos en direcciones opuestas para, más adelante, medir sus respectivas componentes de *spin* (al pasar cada uno de ellos a través de un campo electromagnético inhomogéneo). El experimento permite medir la componente de *spin* de cada una de las partículas en tres direcciones diferentes θ_i ($i=1, 2, 3$). Denotaremos con L_i y R_j ($i, j=1, 2, 3$) las tres posibles orientaciones de los aparatos de medida en cada una de las alas –izquierda, L y derecha, R – del experimento. Por otra parte, escribiremos a y b para los posibles valores que puede tomar el *spin* de cada uno de los electrones. En el estado *singlete* $a, b = +, -$ con probabilidad $\frac{1}{2}$, indicando + una componente de *spin* «hacia arriba», y – un *spin* «hacia abajo». Así, podemos expresar los eventos que representan los diferentes resultados de las medidas de *spin*, a lo largo de las tres posibles direcciones, en cada ala del experimento, como L_i^a y R_j^b , con $a, b = +, -$ y donde $i, j=1, 2, 3$.

El experimento asume además que tanto los eventos L_i y R_j que representan las operaciones de medida en cada una de las alas, como los eventos L_i^a y R_j^b que representan los resultados de éstas, se encuentran siempre en regiones «separadas espacialmente» (*space-like*). Es decir, se encuentran, cada uno de ellos, fuera del cono de luz del evento correspondiente en el ala opuesta del experimento (Figura 1). Este requisito pretende garantizar, bajo una determinada interpretación de la relatividad especial, que los eventos en cada una de las alas del experimento no puedan interferir causalmente con los del ala opuesta.

3. Cf. EINSTEIN, PODOLSKY and ROSEN, 1935.

4. FINE (1986) proporciona una revisión y análisis detallados de las motivaciones, presupuestos que conlleva e implicaciones filosóficas del argumento EPR.

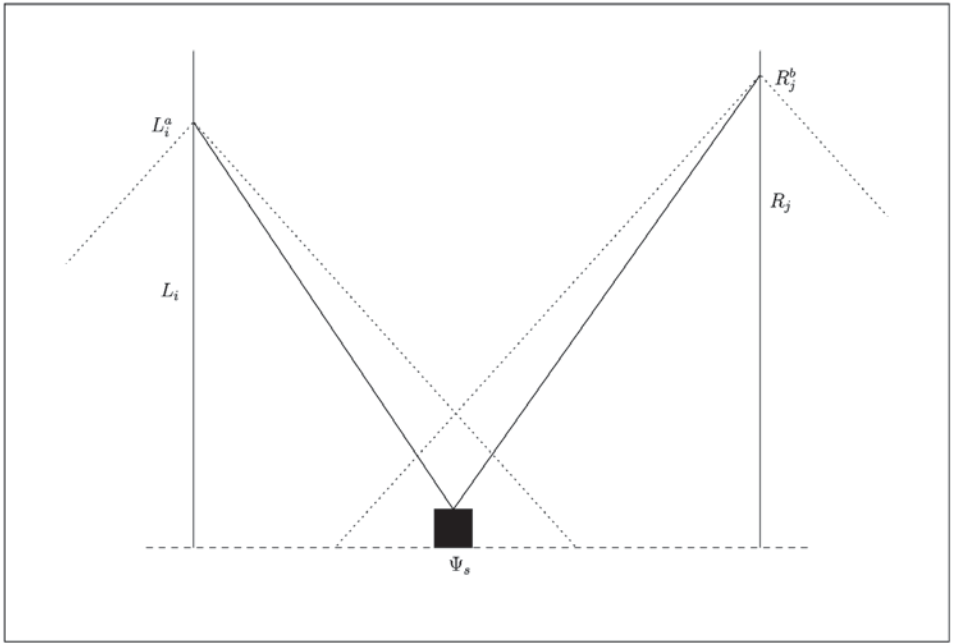


FIGURA 1: *Representación espacio-temporal de un experimento EPR.*

En estas circunstancias, la mecánica cuántica permite calcular las probabilidades de cada uno de los posibles resultados del experimento, que resultan estar correlacionados:

$$p(L_i^a \wedge R_j^b) \neq p(L_i^a) \cdot p(R_j^b),$$

donde $a, b = +, -$ y para $i, j = 1, 2, 3$.

La existencia de este tipo de correlaciones (en adelante correlaciones EPR) ha sido confirmada experimentalmente.

La pregunta que surge es si la aparición de estas correlaciones responde a algún mecanismo causal que, en principio, la teoría no especifica. Una posible respuesta a la pregunta apunta intuitivamente a la idea de causa común. Esto es, a la posibilidad de que las correlaciones EPR, ya que no se deben en principio a interacciones causales directas entre las dos alas del experimento –recordemos que el experimento asume precisamente a tal efecto que los eventos en cada una de las alas pertenecen a regiones «separadas espacialmente» (*space-like*)–, puedan explicarse apelando a la presencia de una causa común.

A pesar de la fuerza intuitiva de esta posibilidad, los diversos modelos propuestos a tal efecto han sido acogidos generalmente con reticencias. En el

origen de las reservas que los filósofos han mostrado respecto del programa está la idea, introducida inicialmente por van Fraassen, de que modelos de causas comunes son esencialmente modelos de «variables ocultas», y que están sujetos a las consecuencias del teorema de Bell. No es necesario entrar aquí en detalles y bastará con señalar que el teorema de Bell impone de manera general restricciones, en forma de desigualdades, sobre la estructura formal que una teoría de variables ocultas debe satisfacer bajo ciertas condiciones intuitivamente necesarias (y habituales) en cualquier teoría física, tales como la separabilidad del sistema o la localidad. (Las desigualdades del teorema de Bell, en concreto, fijan el rango de valores que las variables ocultas pueden asumir). Dichas restricciones, por supuesto, son aplicables a cualquier teoría de variables ocultas que quisiéramos proponer en el contexto del experimento EPR. Es bien conocido, por otro lado, que las desigualdades de Bell se violan, no sólo teóricamente, teniendo en cuenta las predicciones de la mecánica cuántica, sino también experimentalmente⁵. En consecuencia, se toma el teorema de Bell –la violación expresa de las desigualdades de Bell– como una confirmación de la imposibilidad (o de la no existencia) de cierto tipo de variables ocultas (aquéllas que satisfacen los requisitos estándares de localidad, etc.). La identificación de causas comunes y variables ocultas parecería por tanto fatal, si tuviéramos como objetivo proporcionar una explicación causal –de causa común, esto es– de las correlaciones EPR.

Es necesario puntualizar que estos resultados afectan principalmente a la noción de causa común originariamente propuesta por Reichenbach, y que incluye la no poco polémica condición de «apantallamiento» (*screen-off*):

$$p(A \wedge B|C) = p(A|C) \cdot p(B|C). \quad (1)$$

(Una causa C que satisface la expresión (1) se dice que «apantalla» una correlación $Corr(A, B)$, en el sentido de que, condicionando en C , los eventos A y B resultan estadísticamente independientes. Es decir, dada C , la correlación entre A y B desaparece).

En cualquier caso, los argumentos en la línea de van Fraassen no dejan de ser polémicos. De hecho, varios han sido los esfuerzos por salvar la intuición que apunta a una explicación causal de las correlaciones EPR apelando al concepto de causa común. Se pueden distinguir principalmente dos líneas de trabajo en esta dirección. Por un lado, se han hecho varias propuestas sugiriendo que el concepto de causa común es más amplio –o menos restrictivo– que el originalmente adelantado por Reichenbach⁶. No vamos a prestar atención aquí

5. Son famosos en este sentido los experimentos de ASPECT et al. (1982).

6. Los argumentos de este tipo se basan fundamentalmente en el hecho (constatado) de que la caracterización de causa común de Reichenbach, y en concreto la

a este tipo de propuestas y vamos tan solo a centrarnos en la línea de trabajo alternativa, que explora precisamente la posibilidad de dar cuenta de las correlaciones EPR en términos de causas comunes de acuerdo con la concepción de Reichenbach.

Uno de los intentos más significativos en este sentido consiste en proporcionar una definición precisa y formalmente adecuada del concepto de causa común de Reichenbach –que, como hemos dicho, incluye la idea de «apantallamiento»– con el fin de aislar las cuestiones más relevantes o problemáticas en torno a él. Se puede decir que esta línea de investigación constituye un programa filosófico en sí mismo, que se ha venido a llamar «Escuela de Budapest»⁷. La principal contribución del programa se plasma quizá en los llamados teoremas de *extensibilidad* y *completitud*, en virtud de los cuales es posible postular la existencia de una causa común de Reichenbach para una correlación cualquiera dada⁸. Estos resultados son pues una herramienta fundamental para la defensa del principio de causa común de Reichenbach en general y de la posibilidad de proporcionar una explicación causal de las correlaciones EPR en particular.

3. UN MODELO DE CAUSA COMÚN PARA EPR

Sobre la base de los resultados de la «Escuela de Budapest» se propone en San Pedro (*forthcoming*) un modelo de causa común que, aún con ciertas particularidades que en un momento discutiré, constituye una explicación causal plausible y eficaz de las correlaciones EPR. El modelo toma como fundamentales las intuiciones originales de Reichenbach sobre causas comunes, por las que se atribuye a éstas un carácter esencialmente explicativo. No es necesario para nuestro propósito proporcionar aquí los detalles precisos de éste. Bastará con revisar sus principales características y estructura de eventos.

condición de «apantallamiento», no constituye una condición necesaria para poder considerar causa común un evento. Las generalizaciones de Salmon y Cartwright son quizás las propuestas más significativas de este programa. SAN PEDRO and SUÁREZ (2009) ofrece una discusión detallada de su alcance y significancia.

7. *The Budapest School* es la forma en que por ejemplo BUTTERFIELD (2007) se refiere al conjunto de resultados por parte, principalmente, de HOFER-SZABÓ et al. (1999, 2000, 2002).

8. Esta afirmación es cierta con algunos matices, que no es necesario tratar aquí, para correlaciones definidas tanto sobre espacios de probabilidad Booleanos (clásicos) como para álgebras de von Neumann, características de la descripción cuántica.

El rasgo más relevante del modelo es quizá el hecho de que las causas comunes se conciben en él de forma que incluyen información explícita sobre las operaciones de medida realizadas en *ambas* alas del experimento. En concreto, las operaciones de medida son *ambas* causalmente relevantes para las causas comunes postuladas en el modelo. No quiere decir esto, sin embargo, que las causas comunes estén completamente determinadas por las operaciones de medida. De hecho, las causas comunes en el modelo se conciben como resultado de la conjunción de un evento Λ asociado con el estado *singlete* Ψ_S mismo (y posiblemente con algún otro factor causal previo a la preparación de éste)⁹ y las operaciones de medida en ambas alas del experimento:

$$C_{ij}^{ab} \subset L_i \wedge R_j \wedge \Lambda. \quad (2)$$

Por otro lado, las causas comunes del modelo tampoco son deterministas, en el sentido de que la presencia de cualquiera de ellas en particular no determina unívocamente, con probabilidad 1, los resultados del experimento.

En cualquier caso, la dependencia de las causas comunes con respecto a las operaciones de medida conlleva una violación expresa de la condición a la que me referiré como condición de «independencia con respecto a la medida» –que también aparece en la literatura de forma más habitual bajo el nombre de condición de «no conspiración»–, es decir:

$$p(C_{ij}^{ab} \wedge L_i) \neq p(C_{ij}^{ab}) \cdot p(L_i), \quad (3)$$

$$p(C_{ij}^{ab} \wedge L_j) \neq p(C_{ij}^{ab}) \cdot p(L_j). \quad (4)$$

En los argumentos habituales la condición de «independencia con respecto a la medida» (o «no conspiración») se impone sobre las causas comunes

9. Esta caracterización del evento Λ recuerda, en cierto sentido, al tipo de eventos que Cartwright (CARTWRIGHT, 1987; CARTWRIGHT and JONES, 1991; CHANG and CARTWRIGHT, 1993) considera deben ser las causas comunes en el contexto de EPR. La similitud se hace aún más patente en el momento en que comprobamos (como es el caso en el modelo) que el evento Λ así definido no satisface necesariamente las condiciones de «apantallamiento» típicas de las causas comunes Reichenbachianas. En SAN PEDRO (*forthcoming*) defiendo que, así como el evento Λ parece estar más relacionado con la descripción cuántica «interna» del sistema, no es este el caso para las causas comunes. Ya que éstas son postuladas en el modelo partiendo de un punto de vista fenomenológico y en ese sentido puramente clásico (haciendo referencia a los resultados del experimento estrictamente como eventos clásicos, aún reconociendo su origen cuántico). Esto sugiere que las causas comunes no deben concebirse en el modelo como «variables ocultas» al uso, ya que no pretenden completar la descripción cuántica en forma alguna. Su cometido, siguiendo las intuiciones originales de Reichenbach, es mucho más explicativo que otra cosa.

(concebidas como variables ocultas) con el objeto de descartar influencias causales, en virtud de las cuales las decisiones de los experimentadores estarían de alguna manera determinadas por los valores que las causas comunes –que por supuesto se consideran ajenas a aquéllas– pudieran tomar. Esto supondría una clara violación del libre albedrío del experimentador, producto, de alguna forma, de una «conspiración universal». Es importante enfatizar que la significancia de esta condición en este tipo de argumentos se basa en el hecho, presupuesto implícitamente, de que las causas comunes deben ser *anteriores* (temporalmente) a las operaciones de medida. Sea como fuere, el modelo parece susceptible de permitir este tipo de dependencias, «indeseadas» desde el punto de vista del libre albedrío del experimentador.

En nuestro caso, la dependencia explícita de las causas comunes con respecto a las operaciones de medida se justifica a partir del hecho de que las causas comunes ocurren, o tienen lugar, inmediatamente *después* de que las medidas hayan sido realizadas. Como acabamos de señalar, es sólo bajo la suposición de que las causas comunes son anteriores a las operaciones de medida –así como, por supuesto, a las decisiones que toma el experimentador en relación a éstas– que la condición de independencia de la causa común con respecto a la medida tiene sentido. Sin embargo, no hay nada en la noción de causa común propiamente, ni en la estructura en sí del experimento EPR, que nos fuerce a tomar esta suposición como correcta. Es perfectamente factible, por tanto, suponer que las causas comunes ocurren con (inmediata) *posterioridad* a las operaciones de medida (y desde luego a las decisiones tomadas por el experimentador). En tal caso, no habría nada conspiratorio en el hecho de que las causas comunes reflejaran una dependencia estadística (e incluso causal) con respecto a las operaciones de medida.

Una consecuencia directa de este tipo de dependencia estadística es la violación de la condición de factorizabilidad de Bell¹⁰:

$$p(L_i^a \wedge R_j^b | L_i \wedge R_j \wedge C_{ij}^{ab}) \neq p(L_i^a | L_i \wedge C_{ij}^{ab}) \cdot p(R_j^b | R_j \wedge C_{ij}^{ab}). \quad (5)$$

La violación de la *factorizabilidad* tiene dos consecuencias obvias. Una que puede interpretarse en favor del modelo y otra que, al contrario, plantea diversos problemas. En primer lugar, y dado que la condición de *factorizabilidad* es a su vez necesaria para la derivación de las desigualdades de Bell, su violación

10. La violación de la *factorizabilidad* en el modelo se debe fundamentalmente a la violación de otra condición que está estrechamente ligada a la posible dependencia/independencia de las causas comunes con respecto a las operaciones de medida. Esta es la llamada condición de «independencia de parámetro» (*parameter independence*) que, por otro lado, resulta ser condición necesaria para la *factorizabilidad de Bell*.

implica, en consecuencia, que el teorema de Bell no es aplicable en nuestro caso. En otras palabras, el modelo es inmune a las críticas normalmente relacionadas con los modelos de causa común en el contexto de las correlaciones EPR que he señalado anteriormente. Más aún, el modelo resulta en este sentido completamente compatible con las predicciones de la mecánica cuántica. Por otro lado, sin embargo, es ciertamente habitual interpretar la violación de la *factorizabilidad* de Bell como un signo de comportamiento no local. En concreto, está bastante extendida la idea de que la *factorizabilidad* de Bell, u otras condiciones próximas a ésta, se corresponde con la idea de localidad física¹¹.

Podríamos haber defendido, con objeto de mantener el carácter local de los eventos y sus interacciones sin volver a caer a la vez en la crítica de la conspiración, la existencia de relaciones causales hacia atrás en el tiempo o *retrocausalidad* (*backwards causation*). Price (1994) sugiere una explicación causal de EPR en esta línea¹². En el modelo propuesto por Price, el que las influencias causales que se propaguen hacia atrás en el tiempo permite que éstas se mantengan dentro de los conos de luz correspondientes. En otras palabras, es precisamente la capacidad que las causas tienen en este modelo de interactuar con eventos en su pasado lo que garantiza la localidad de esas mismas interacciones. En tal caso, es fácil ver que la condición de «independencia con respecto de la medida» se viola debido a la influencia que las operaciones de medida tienen sobre las causas comunes, situadas en el pasado de aquéllas.

Debo señalar que la estructura formal –reflejada en este caso en las relaciones probabilísticas– del modelo de Price y el modelo propuesto en San Pedro (*forthcoming*) es exactamente la misma. La diferencia entre los dos modelos estriba en la interpretación de la violación de la condición de «independencia con respecto a la medida», haciendo uno referencia a influencias causales que se propagan hacia atrás en el tiempo, y proponiendo el otro causas comunes que tienen lugar con posterioridad (inmediata) a la realización de las operaciones de medida en ambas alas del experimento. Creo sin embargo que esta última interpretación resulta, al menos intuitivamente, más ventajosa que la primera debido precisamente al hecho de que la existencia de una *retrocausalidad* resulta verdaderamente extraña. No podemos obviar, en cualquier caso, que la solución propuesta en San Pedro (*forthcoming*) no deja de presentar problemas

11. BUTTERFIELD, 1989, 2007, por ejemplo, proporciona un argumento de este tipo tomando como noción de localidad física lo que él llama «localidad estocástica de Einstein», una condición ciertamente inspirada en la *factorizabilidad* de Bell. Aunque este tipo de argumentos no dejan de ser controvertidos (MAUDLIN, 1994), son de hecho parte de la opinión más generalizada.

12. Cf. PRICE, 1994.

conceptuales en tanto que, como hemos visto, proporciona una explicación causal explícitamente de signo claramente no local¹³.

4. UNA ONTOLOGÍA DE EVENTOS DESLOCALIZADOS

Concibo, en principio, dos formas diferentes en que el modelo arriba esbozado puede ser interpretado. Ambas interpretaciones, sin embargo, requerirán una revisión de la ontología del experimento, lo que, en cualquier caso, no supone una novedad cuando se trata de la mecánica cuántica.

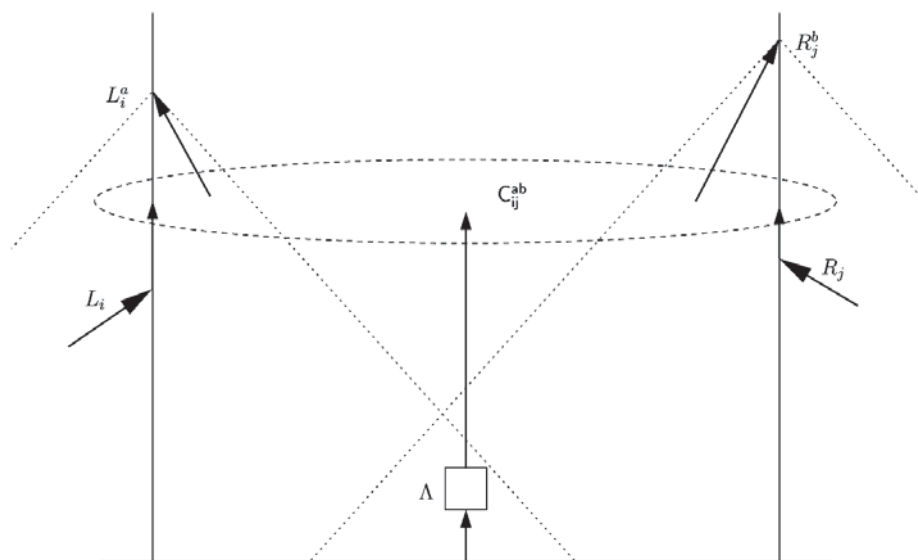


FIGURA 2: Interpretación de las causas comunes C_{ij}^{ab} como eventos deslocalizados que actúan de forma local para causar los resultados correspondientes. (Las líneas continuas representan influencias causales).

En una primera interpretación, las causas comunes C_{ij}^{ab} que el modelo propone pueden concebirse como eventos deslocalizados que, de alguna manera, se extienden en el espacio-tiempo. La deslocalización de los eventos «causas

13. Esto, por otro lado, no es en absoluto novedoso. Hay de hecho un consenso bastante generalizado en cuanto a que las consecuencias del teorema de Bell son indicativas fundamentalmente del carácter no local de la mecánica cuántica.

comunes» tiene, como veremos, importantes consecuencias conceptuales. Por otro lado, es precisamente esta deslocalización lo que permite que las causas comunes actúen causalmente de forma completamente local.

Es posible entender las interacciones del modelo como una cadena causal en dos pasos. En una primera instancia, la causa común C_{ij}^{ab} resulta de la interacción causal de las operaciones de medida en *ambas* alas del experimento por un lado, y del evento Λ asociado al estado *singlete* –que puede a su vez incluir otros factores causales además del estado cuántico del sistema en sí– por otro. Es importante señalar que los eventos asociados, tanto a las operaciones de medida como al estado *singlete* (y demás factores causalmente relevantes), actúan de forma completamente *local*, si bien la conjunción de éstos resulta en un evento –la causa común– no localizado en el espacio-tiempo. En segunda instancia, y una vez definido el evento (deslocalizado) C_{ij}^{ab} en esta forma, éste actúa, como causa común, y de nuevo de forma completamente *local*, para producir los eventos asociados a los resultados correspondientes en cada ala del experimento. La estructura causal resultante de esta interpretación puede verse en el diagrama de la Figura 2 (donde las influencias causales se representan mediante flechas con líneas continuas).

Son pertinentes varias apreciaciones. En primer lugar, como hemos dicho, las causas comunes C_{ij}^{ab} , al no estar localizadas, se extienden en el espacio-tiempo. Esto confiere al modelo un carácter claramente no local que se muestra ya en el hecho de que las operaciones de medida realizadas en las dos alas del experimento son ambas causalmente relevantes para las causas comunes.

Por otro lado, la deslocalización de los eventos «causa común» no implica necesariamente que éstos deban ocupar, por así decirlo, regiones enteras de los conos de luz correspondientes a los resultados del experimento (representados en el diagrama mediante líneas discontinuas). La razón para ello es muy sencilla: si fuera ese el caso, los eventos C_{ij}^{ab} serían causas comunes deterministas de los resultados correspondientes –es decir, causarían esos resultados con probabilidad 1–, lo que a primera vista supondría un conflicto con la superveniencia Humeana. En concreto, el conflicto radica en el hecho de que en ese caso todas las causas comunes C_{ij}^{ab} ($a, b = +, -$ y $i, j = 1, 2, 3$), cada una de las cuales se asume en el modelo diferente a las demás, aparecerían como resultado de exactamente los mismos factores causales. En otras palabras, existirían en el modelo eventos –las causas comunes– que, habiendo sido postulados como diferentes, tendrían exactamente el mismo origen causal. Es decir, estarían todos ellos causados por exactamente el mismo (único) evento, lo que en efecto conllevaría una violación de la superveniencia¹⁴. Para evitar este tipo de

14. Debo esta apreciación a Mauricio Suárez.

dificultades debemos permitir, a menos que rechacemos por completo la idea de superveniencia Humeana, que las causas comunes operen de forma genuinamente indeterminista. Una posibilidad sería, por ejemplo, requerir que el evento Λ incorporara, además de la información específica referente al estado *singlete*, otros factores causales, diferentes para cada una de las causas comunes resultantes.

Finalmente, debemos apuntar que las causas comunes en esta interpretación del modelo son completamente compatibles con la teoría de la relatividad y, por su estructura, pudieran asemejarse al concepto de *quanta*, introducido por Teller (1995) en el contexto de la teoría cuántica de campos, en relación a la noción de partícula elemental¹⁵. No significa esto sin embargo que las causas comunes del modelo son (o representan) partículas elementales. La idea es más bien que las causas comunes pudieran heredar, por decirlo de alguna manera, las propiedades típicas de aquellas partículas –electrones, fotones, etc.– típicas de un experimento EPR, y que sí pueden ser concebidas, *á la* Teller, como *quanta*. En cualquier caso, en mi opinión, la referencia a los *quanta* de Teller no parece capaz de extenderse más allá de un nivel cualitativo.

5. EVENTOS LOCALIZADOS CON INFLUENCIAS CAUSALES NO LOCALES

Una segunda interpretación posible del modelo consiste en adoptar la percepción, en general más extendida, de evento como entidad bien definida (localizada) espacio-temporalmente¹⁶.

En tal caso, y dado que las causas comunes se localizan ahora en regiones puntuales del espacio-tiempo, nos vemos forzados a aceptar, al menos en primera instancia, que las influencias causales que ejercen deban propagarse de manera no local. Y lo que es más, estas causas comunes aparecen ya como resultado de influencias causales no locales debidas a los eventos que representan las operaciones de medida realizadas en ambas alas del experimento. (Recordemos a tal efecto que las causas comunes en el modelo emergen en parte como resultado conjunto de *ambas* operaciones de medida). En particular, aunque el evento Λ asociado con el estado *singlete* opera localmente como causa parcial de C_{ij}^{ab} ,

15. Sin entrar en detalles, los *quanta* se pueden definir como ocurrencias de estados excitados bien definidos del campo cuántico. Ver TELLER, 1995, para más detalles.

16. La idea de localizabilidad se usa, por lo general, sólo en relación a los llamados eventos *token* (instancias particulares y bien definidas en espacio y tiempo). Así, expresiones como «causas comunes localizadas espacio-temporalmente» tienen sólo sentido en tanto en cuanto los eventos tipo (*type*) correspondientes se conciben como colecciones de eventos *token*.

es necesario que las operaciones de media L_i y R (o al menos una de ellas) operen de forma no local para que la causa común resulte del evento conjunto $L_i \wedge R_j \wedge \Lambda$, como el modelo prescribe. El diagrama de la Figura 3 representa el mecanismo causal descrito con cierto detalle.

El problema quizá más acuciante a que nos enfrentamos en esta interpretación del modelo viene de la mano de los «poderes causales no locales» que las causas comunes exhiben, ya que éstos parecen implicar la existencia de influencias superluminales, que entrarían en conflicto con la teoría de la relatividad. La clave está, sin embargo, no tanto en la existencia en sí de este tipo de influencias que se propagan a velocidades mayores que la de la luz, sino en el hecho de si son éstas capaces o no de transmitir información por medio de señales (superluminales también). En otras palabras, la cuestión que nos debe preocupar es si el modelo implica o no la existencia de mecanismos capaces de transmitir información efectiva, que conlleve por ejemplo una transferencia de masa o energía, a velocidad mayor que la de la luz. Ya que es precisamente la existencia de este tipo de señales superluminales lo que la teoría de la relatividad no contempla, y podrían por tanto dar lugar a conflictos.

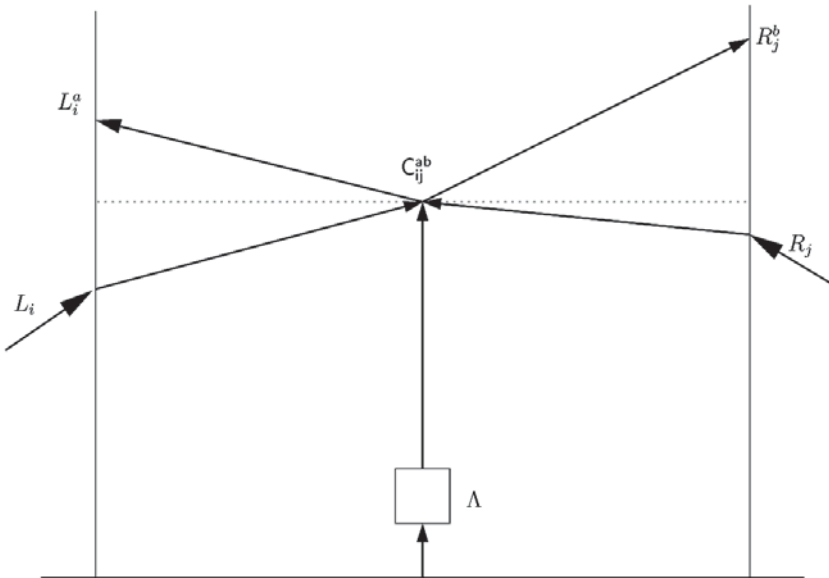


FIGURA 3: *Las causas comunes C_{ij}^{ab} se conciben en este caso como eventos bien localizados espacio-temporalmente que sin embargo operan de forma no local para causar los resultados correspondientes. (Las influencias causales se representan mediante líneas continuas).*

Se me ocurren al menos dos posibles vías por las que tratar de evitar este tipo de dificultades. Por un lado, estaremos de acuerdo en afirmar que el concepto de «señal» está muy estrechamente ligado al de causalidad. Tanto es así que podríamos incluso argumentar que la noción de señal es extremadamente sensible a lo que de hecho entendemos por causalidad (o relación causal). Así, diferentes conceptos de causalidad resultarán en diferentes formas de concebir la propagación de señales. Por ejemplo, y dado que la noción de señal en este contexto está generalmente asociada a la transferencia de una cantidad física –tal como materia, energía, etc.–, una teoría contrafáctica de la causalidad no contendría en ningún caso propagación de señales, ya fueran superluminales o no. Otra teoría de la causalidad aportaría, en cambio, una noción diferente de señal. Teniendo en cuenta estas consideraciones, por tanto, no parece fácil decidir, sin haber previamente fijado nuestra concepción de relación causal, sobre la existencia de señales superluminales a partir de simples relaciones estadísticas (como las que el modelo propone).

Alternativamente, incluso en el caso de que aceptáramos la presencia de señales superluminales en el modelo, la existencia de entidades tales como los *taquiones* –cuya propiedad principal es precisamente su capacidad de propagarse a velocidades mayores que la de la luz– no ha sido descartada empíricamente. Además, la existencia de *taquiones* no supone un conflicto expreso en el marco particular de la relatividad especial¹⁷.

En resumen, se puede decir que las causas comunes así concebidas, aún asociadas a influencias causales no locales, constituyen también una interpretación viable de la estructura causal del modelo esbozado en la Sección 3.

Me gustaría apuntar para finalizar que no es en absoluto mi intención adoptar en particular ninguna de las dos interpretaciones aquí discutidas.

Sería necesario para poder pronunciarse en este sentido llevar a cabo un análisis detallado de las virtudes y defectos de cada una de las interpretaciones, que debo dejar sin embargo para futuras investigaciones.

17. Cf. MAUDLIN (1994, Ch. 3).

BIBLIOGRAFÍA

- ASPECT, A.; DALIBARD, J. y ROGER, G., «Experimental test of bell's inequalities using time-varying analyzers», *Physical Review Letters*, 49 (1982), 1804-1807.
- BUTTERFIELD, J., «A space-time approach to the Bell inequality», en: CUSHING, J. y McMULLIN, E. (eds.), *Philosophical consequences of quantum theory*, Universidad de Notre Dame Press, 1989, pp. 114-44
- «Stochastic Einstein's locality revisited», *British Journal for the Philosophy of Science*, 58 (2007), pp. 805-867.
- CARTWRIGHT, N., «How to tell a common cause: Generalizations of the conjunctive fork criterion», en: FETZER, J. H. (ed.), *Probability and causality*, Reidel Pub. Co., 1987, pp. 181-188.
- CARTWRIGHT, N. y JONES, M., «How to hunt quantum causes», *Erkenntnis*, 35 (1991), pp. 205-231.
- CHANG, H. y CARTWRIGHT, N., «Causality and realism in the EPR experiment», *Erkenntnis*, 38 (1993), pp. 169-190.
- EINSTEIN, A.; B. PODOLSKY, B. y ROSEN, N., «Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?», *Physical Review*, 47 (1935), pp. 777-780.
- FINE, A., *The shaky game. Einstein realism and the quantum theory*, The University of Chicago Press. 2nd edition, 1996.
- GRABHOFF, G.; S. PORTMAN, S. y WÜTHRICH, A., «Minimal assumption derivation of a Bell-type inequality», *The British Journal for the Philosophy of Science*, 56 (2005), pp. 663-680.
- HOFER-SZABÓ, G.; RÉDEI, M. y SZABÓ, L. E., «On Reichenbach's common cause principle and Reichenbach's notion of common causes», *The British Journal for the Philosophy of Science*, 50 (1999), pp. 377-399.
- «Common cause completability of classical and quantum probability spaces», *International Journal of Theoretical Physics*, 39 (2000), pp. 913-919.
- «Common causes are not common-common causes», *Philosophy of Science*, 69 (2002), pp. 623-636.
- MAUDLIN, T., *Quantum non-locality and relativity*, Blackwell Publishing. 2nd edition, 2002.
- PRICE, H., «A neglected route to realism about quantum mechanics», *Mind*, 103 (1994), pp. 303-336.
- SAN PEDRO, I. (*forthcoming*), Measurement dependence is not conspiracy: A cause model of epr correlations. Forthcoming pending revisions.
- SAN PEDRO, I. y SUÁREZ, M., «Reichenbach's principle of the common cause and indeterminism: A review», en: RECIO, J. G. (ed.), *Philosophical essays in physics and biology*, Georg Olms.
- SZABÓ, L. E., «On an attempt to resolve the EPR-Bell paradox via Reichenbachian concept of common cause», *International Journal of Theoretical Physics*, 39 (2000), pp. 911-926.
- «The Einstein-Podolsky-Rosen argument and the Bell inequalities», en: *The Internet Encyclopedia of Philosophy*.
- TELLER, P., *An Interpretive Introduction to Quantum Field Theory*, Princeton University Press, 1995.
- VAN FRAASSEN, B. C., «The charybdis of realism: Epistemological implications of Bell's inequality», *Synthese*, 52 (1982), pp. 25-38.