

Procesos Causales, Realismo y Mecánica Cuántica¹

Mauricio Suárez,
Departamento de Lógica y Filosofía de la Ciencia,
Facultad de Filosofía,
Universidad Complutense de Madrid,
28040 Madrid, Spain.
Email: msuarez@filos.ucm.es

Resumen:

En un influyente artículo, publicado en 1982, Bas van Fraassen desarrolló un argumento en contra del realismo causal a partir de un análisis de las correlaciones EPR. Varios filósofos de la ciencia y expertos en inferencia causal, incluidos algunos realistas causales como Wesley Salmon, han aceptado el argumento de Van Fraassen, interpretándolo como una prueba irrefutable de que las correlaciones cuánticas no son susceptibles de explicación causal alguna. La teoría de la explicación causal de Wesley Salmon encuentra, según el mismo Salmon, una importante dificultad en las correlaciones Einstein-Podolsky-Rosen (EPR) de la mecánica cuántica. En este artículo me propongo demostrar que – lejos de refutar el realismo causal – el argumento de Van Fraassen constituye una buena guía tanto de los distintos modelos causales posibles para las correlaciones EPR, como de sus virtudes y defectos relativos. Las correlaciones EPR son un excelente banco de pruebas para contrastar y comparar las distintas teorías de explicación causal.

Contenidos:

1. Las correlaciones Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm.
2. Correlaciones, “Forks” y Procesos Causales: La Teoría de Wesley Salmon.
3. Modelos Causales para las Correlaciones EPR.
4. Argumentos en Contra de los Modelos Causales de EPR.
5. Respuestas y Alternativas.
6. Conclusiones.

1. Las Correlaciones Einstein-Podolsky-Rosen (EPR)

En 1935 Einstein Podolsky y Rosen publicaron un famoso artículo ² en el que por primera vez se describe un experimento mental que hace mención de las correlaciones

¹ Este artículo es una versión del ensayo en inglés (Suárez, 2004b), y desarrolla algunas de las líneas maestras de un artículo original en español (Suárez, 1994). Agradezco a los organizadores la invitación para presentar este artículo en el congreso de Barcelona, y a los participantes, en especial a Martin Jones, los muchos comentarios recibidos. La fase final de la investigación ha sido financiada por el proyecto BFF2002-01552 del Ministerio de Ciencia y Tecnología español, titulado “Causalidad, Determinismo y Probabilidad en la Mecánica Cuántica y Teoría de la Relatividad”.

cuánticas no-locales, o a distancia, entre dos sistemas entrelazados, hoy en día denominadas correlaciones EPR. La versión del experimento “EPR” que ha conseguido una mayor difusión y que subyace a los experimentos que de hecho se han llevado a cabo hasta ahora es aquella descrita por David Bohm.³

En el experimento Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm dos partículas (“1” y “2”) cuyos estados están “entrelazados” (o bien porque han interactuado en el pasado, o bien porque han sido creadas simultáneamente en un evento de “decay”), se desplazan en direcciones opuestas. En un diagrama de espacio-tiempo de Minkowski ambas partículas describen recorridos simétricos con respecto al eje temporal (véase la figura 4.1.) El momento angular inicial, con anterioridad al evento de creación es cero, por lo que los valores de espín de las partículas deben estar correlacionados. El espín de cualquiera de las partículas puede medirse por medio de un aparato de Stern-Gerlach. (Se trata de un magnetómetro que imprime sobre la partícula una fuerza proporcional a su valor de espín, correlacionando así de manera perfecta la posición de la partícula con su valor de espín en el momento en que ésta interactúa con el magnetómetro. Puede rotarse el magnetómetro en cualquier dirección para de esta manera realizar mediciones del espín de las partículas en distintas direcciones).

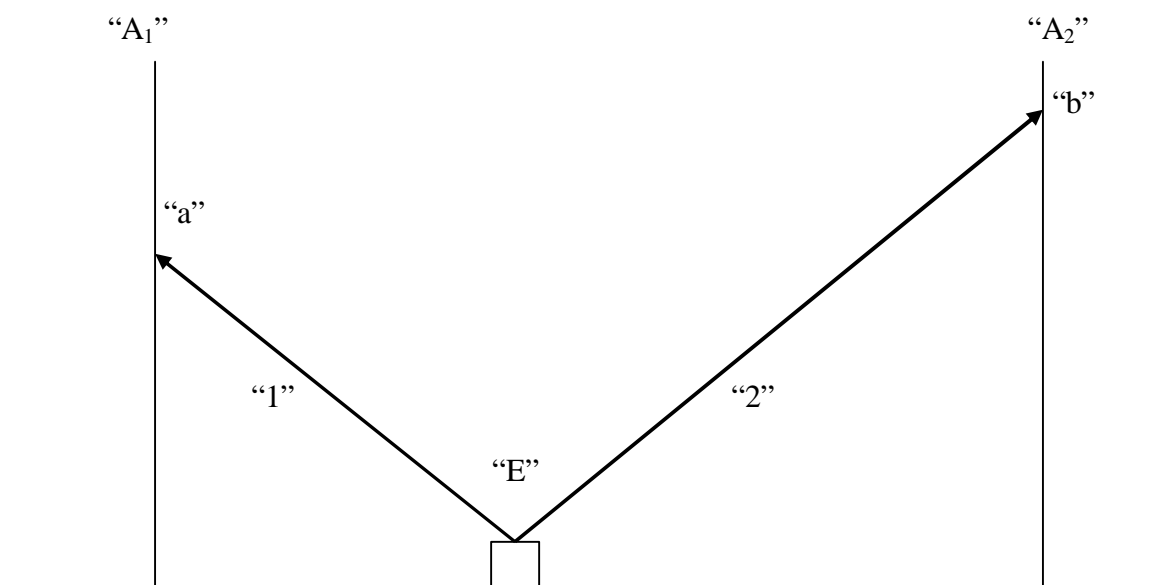


Figura 1.

Se mide el espín de cada partícula en el ala correspondiente del laboratorio; los resultados de cada experimento “a” y “b” (las líneas “A₁” y “A₂” representan las líneas de mundo de los dos aparatos de medición, que se encuentran en reposo con respecto al marco de referencia del laboratorio) constituyen lo que se denomina un suceso-resultado (“outcome event”). Una característica importante del experimento Einstein-Podolsky-Rosen es que estos sucesos-resultado se encuentran “espacialmente” conectados (“spacelike connected”), es decir, se encuentran cada uno

² Einstein, Podolsky and Rosen, (1935).

³ Bohm (1951, cap. 22).

fuera del cono de luz del otro. Por lo tanto una señal que viaje de uno a otro debe necesariamente, durante al menos alguna parte finita de su recorrido, viajar a velocidad mayor que la de la luz. Como más adelante apuntaré las implicaciones de este hecho con respecto a la compatibilidad de las correlaciones EPR con la teoría especial de la relatividad son profundas y complejas, y han sido objeto de intensos debates.⁴

De acuerdo con la mecánica cuántica solo hay dos valores de espín en cualquier dirección de medida θ : Espín “más” (\uparrow_{θ}) y espín “menos” (\downarrow_{θ}). La mecánica cuántica describe el estado de espín del sistema compuesto de ambas partículas en el momento de la emisión y también de la medida mediante lo que se conoce como “estado de singlete”:

$$\Psi = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(|\uparrow_{1q}\rangle |\downarrow_{2q}\rangle - |\downarrow_{1q}\rangle |\uparrow_{2q}\rangle \right).$$

(En esta expresión los subíndices se refieren a las partículas “1” y “2”). La teoría ofrece dos tipos de predicciones probabilísticas. Primero, nos ofrece predicciones acerca de los resultados de los procesos de medición realizados en la cada partícula. Para calcular estas predicciones, debemos primero aplicar el llamado *axioma de reducción*, que nos permite derivar los estados de cada una de las partículas individualmente;⁵ es decir los estados W_1 y W_2 que podemos adscribir a cada una de las partículas siempre y cuando éstas continúen formando parte de un sistema compuesto en estado de singlete:

$$W_1 = \frac{1}{2} |\uparrow_{1q}\rangle \langle \uparrow_{1q}| + \frac{1}{2} |\downarrow_{1q}\rangle \langle \downarrow_{1q}|,$$

$$W_2 = \frac{1}{2} |\uparrow_{2q}\rangle \langle \uparrow_{2q}| + \frac{1}{2} |\downarrow_{2q}\rangle \langle \downarrow_{2q}|.$$

La mecánica cuántica nos permite realizar sobre la base de estos dos estados dos tipos de predicciones:

1. Probabilidades de resultados de mediciones realizadas en cada una de las partículas, para cualquier dirección determinada θ :

$$prob(\uparrow_{1q}) = \langle \Psi | \uparrow_{1q} \rangle \langle \uparrow_{1q} | \Psi \rangle = \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \right)^2 = \frac{1}{2}.$$

$$prob(\downarrow_{1q}) = prob(\uparrow_{2q}) = prob(\downarrow_{2q}) = prob(\uparrow_{1q}) = \frac{1}{2}.$$

2. Probabilidades condicionales de resultados de mediciones realizadas en una de las dos partículas, condicionadas sobre cualquier resultado específico de una medición realizada en la otra partícula:

⁴ Véase Maudlin (1995).

⁵ Véanse Hughes (1989, pp. 149-50) y Suárez (2004, apéndice 1).

$$prob(\uparrow_{2q}/\uparrow_{1q}) = \frac{prob(\uparrow_{2q} \wedge \uparrow_{1q})}{prob(\uparrow_{1q})} = \text{sen}^2 \frac{1}{2}(\mathbf{q}', \mathbf{q})$$

Y en el caso específico en que $\theta = \theta'$:

$$prob(\uparrow_{2q}/\downarrow_{1q}) = 1 = prob(\downarrow_{2q}/\uparrow_{1q}),$$

$$prob(\downarrow_{2q}/\downarrow_{1q}) = 0 = prob(\uparrow_{2q}/\uparrow_{1q}).$$

Esto nos permite observar que cuando medimos el espín de ambas partículas en la misma dirección, el estado singlete nos presenta una anti-correlación entre sus valores de espín. Si medimos el espín de la primera partícula en la dirección θ , y encontramos que el resultado corresponde a espín “más”, o (\uparrow_{θ}), podemos predecir que el resultado de una medición posterior del espín de la segunda partícula en la dirección θ será con certeza “menos” o (\downarrow_{θ}).

En otras palabras, la descripción que nos ofrece el estado singlete ψ del sistema compuesto, contiene el mayor grado de información posible sobre ambos sistemas. Por el contrario al considerar solo la descripción de los sistemas individuales, W_1 y W_2 , que obtenemos al aplicar el axioma de reducción, veremos que hemos perdido información relevante. Erwin Schrödinger fue quizás el primero en darse cuenta de que una “porción del conocimiento del sistema compuesto” se encontraba “despilfarrada (“squandered”) en enunciados condicionales que operan entre los subsistemas”.⁶ La necesidad que expresan estos enunciados, según la mecánica cuántica, es meramente nomológica, y no parece obedecer a ningún proceso físico. Por lo menos, el formalismo cuántico no describe ningún proceso físico que pueda transmitir la información requerida de un sistema al otro.

Una explicación causal de estas correlaciones tendría por lo tanto que introducir algún tipo de mecanismo, o hipótesis física adicional para explicar estos enunciados condicionales. En un modelo causal la “porción adicional del conocimiento” no estaría “despilfarrada en enunciados condicionales”. Por ejemplo en un modelo en que las causas operasen directamente entre las dos alas del experimento, la “porción extra” del conocimiento podría transmitirse directamente de un subsistema a otro por medio de “transmisores de marcas”.⁷

2. Correlaciones, “Forks” y Procesos Causales: La Teoría de Wesley Salmon.

En este artículo me propongo defender la posibilidad de una explicación causal de las correlaciones EPR que satisfaga las condiciones de la teoría de Wesley Salmon de la explicación científica por medio de procesos causales, la teoría desarrollada en su

⁶ Schrödinger (1933, p. 161).

⁷ “Mark-transmitter” es el término que utilizan Hans Reichenbach (1956, p. 198), y Wesley Salmon (1984, pp. 148-150).

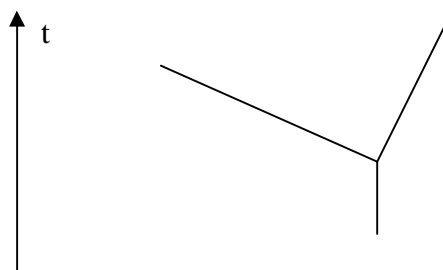
libro de 1984.⁸ Puede resultar ilustrativo explicar de nuevo alguno de los elementos principales de tal teoría. De acuerdo con la teoría de Salmon el objeto típico de una explicación causal (que constituye su “explanandum”) es una correlación estadística entre dos tipos de suceso A y B:

$$prob(A \& B) \neq prob(A)prob(B).$$

Esta correlación estadística recibe una explicación causal por medio de procesos causales y sus interacciones, que por lo tanto constituyen el explanans. Salmon define un *proceso* como un objeto dinámico que muestra consistencia de propiedades durante su existencia, y puede ser representado como una línea de mundo en un espaciotiempo cuatridimensional.⁹ La subsiguiente distinción entre procesos causales y pseudo-procesos es notoriamente compleja, y ha sido objeto de un gran número de modificaciones posteriores.¹⁰ Salmon, inspirado en las ideas de Reichenbach, define un *proceso causal* como un proceso capaz de transmitir una “marca”, o sea una alteración de una propiedad del proceso resultado de una única interacción. (Una *interacción* es, según Salmon, una intersección de dos procesos que genera un cambio de propiedades en ambos procesos). Decimos que un proceso transmite una “marca” si tal cambio de propiedad reaparece, a partir de la intersección, en cada punto del espacio-tiempo que compone el resto de la línea de mundo del proceso.

Las interacciones se dividen en tres tipos, dependiendo de la forma de la intersección que las genera:

Interacciones-Y:

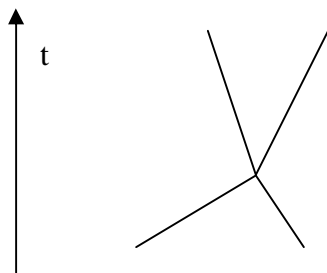


⁸ Desde entonces la teoría ha sido objeto de desarrollos ulteriores significativos – véase Dowe, 2000. En general estos desarrollos ulteriores han venido a reforzar lógicamente las condiciones para la explicación causal, por lo que prácticamente cualquier modelo que satisfaga las condiciones de la teoría de 1984 *ipso facto* será capaz de satisfacer las condiciones más exigentes de las teorías posteriores. Esta es la razón pragmática por la que en este artículo asumo la teoría de 1984; no debe tomarse este trabajo como una defensa de la teoría de Salmon de 1984, en perjuicio de otras teorías posteriores, o de otras teorías de la causalidad física.

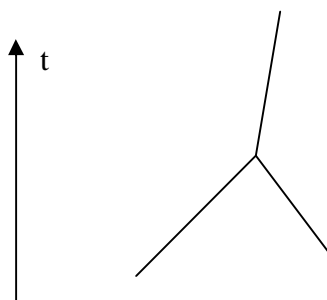
⁹ Salmon (1984, pp. 139-147).

¹⁰ Véase Salmon (1994).

Interacciones-X:



Interacciones-λ:



Las interacciones son eventos en el espaciotiempo, que tienen la capacidad de efectuar cambios en las propiedades de ciertos objetos físicos. Ya hemos visto que el objeto de una explicación científica, su *explanandum*, es, según Salmon, una correlación estadística. La teoría de Salmon de 1984, elabora las ideas originales de Reichenbach, añadiendo los llamados “forks” a los procesos e interacciones causales requeridos en el explanans de una explicación causal.

Fork Conjuntivo (Conjunctive Fork):

- i) $P(A \& B) > P(A) P(B)$
- ii) $P(A \& B/C) = P(A/C) P(B/C)$

Según este “fork” existe además de la correlación estadística una relación de *screening-off* entre el suceso “C” que hace las veces de causa común explicativa, y los sucesos correlacionados “A” y “B” que figuran en el explanandum. Esta estructura es quizás más habitual en casos de *interacciones-Y*, donde el tipo de suceso que constituye la bifurcación es también la causa común, y veremos más adelante que esta combinación (interacción-y con estructura de fork conjuntivo) es particularmente apropiada como posible aplicación a las correlaciones EPR.

Fork Interactivo (Interactive Fork):

- i) $P(A \& B) > P(A) P(B)$
- ii) $P(A \& B/C) > P(A/C) P(B/C)$

En esta estructura la correlación positiva entre los sucesos que tratamos de explicar no desaparece al condicionar sobre la causa común. Salmon (1984, pp. 168-174) introdujo este tipo de estructura para extender su modelo de explicación causal a las causas comunes probabilísticas que no satisfacen la relación de screening-off.

Fork Perfecto (Perfect Fork):

- i) $P(A\&B) > P(A) P(B)$
- ii) $P(A\&B/C) = 1$

Esta estructura es simplemente el caso límite de los dos forks anteriores, en el que la causa común determina con probabilidad uno la ocurrencia de la conjunción de los sucesos – y se cumple siempre en el caso: $P(A/C) = 1 = P(B/C)$.

Según Salmon el *explanans* de una explicación causal típica tiene tres componentes diferenciados: procesos causales, que son el medio de propagación y transmisión de la estructura y el orden causal; interacciones causales, caracterizadas como interacciones $-X$, $-Y$, o $-\lambda$ que cumplen las condiciones de forks interactivos; y causas comunes conjuntivas, que son el tipo específico de interacciones causales que cumplen las condiciones de fork conjuntivo.¹¹

La teoría de 1984 de Salmon ha demostrado en general ser un buen modelo de la práctica de la explicación causal. Casi todas las objeciones que posteriormente se han realizado a la teoría – incluso aquellas poderosas objeciones que han conducido al mismo Salmon a abandonar la condición de transmisión de marcas en favor de otra basada en principios de conservación – han sido de tipo conceptual y no empírico.¹² En los escritos de Salmon se menciona solamente un posible contraejemplo empírico a la condición de transmisión por marcas; es decir solo un ejemplo de correlación que debería poder ser explicada causalmente pero que no puede recibir tal explicación según la condición de transmisión de marcas: las correlaciones EPR de la mecánica cuántica. Salmon adopta el análisis de Van Fraassen y escribe:

“¿Es posible dar una explicación causal de los fenómenos de la mecánica cuántica? Van Fraassen argumenta coherentemente, sobre la base de las desigualdades de Bell y otros resultados experimentales relevantes, que “existen fenómenos establecidos que no pueden enmarcarse (“can not be embedded”) en ningún modelo de causa común”.¹³

“Cuando nos preguntamos por el mecanismo causal (o de cualquier otro tipo) que subyace a la producción de las correlaciones EPR, no somos capaces de encontrar ninguno”.¹⁴

¹¹ Salmon (1984, pp. 178-182). Salmon no aclara si los tres componentes son necesarios en toda explicación causal. Parece lógico suponer que (el explanans de) toda explicación causal consta necesariamente de procesos causales y al menos uno de los tres tipos de fork, sea conjuntivo o interactivo.

¹² Salmon (1994).

¹³ Salmon (1984, p. 254). Todas las traducciones son mías.

¹⁴ Salmon, (ibid, p. 251).

“Este tipo de conservación remota [...] es una fuente de perplejidad. ¿Por medio de qué mecanismo, sentimos que debemos preguntar, se encarga la naturaleza de conservar el espín en este caso?”¹⁵

En otras palabras Salmon considera que las correlaciones cuánticas son un preocupante caso de correlación empírica que no admite tratamiento de acuerdo con su teoría de la explicación causal. La referencia al argumento de Van Fraassen es explícita y encabeza tal consideración.¹⁶ Comparto la preocupación de Salmon: no sería una buena noticia para una teoría de la explicación de correlaciones estadísticas por medio de causas *físicas*, si ésta no tuviese aplicación a las correlaciones más reconocidas de la teoría mejor establecida de la física fundamental.

El propósito de este artículo es rescatar y defender la teoría de Salmon, demostrando que la sospecha no está fundamentada. El argumento de Van Fraassen se interpreta a menudo como una refutación del realismo causal: la tesis metafísica que afirma que toda correlación estadística entre cantidades observables o susceptibles de medición debe tener una explicación causal. Mi análisis se propone demostrar que, lejos de constituir una refutación del realismo causal, el argumento de Van Fraassen constituye una buena guía panorámica de las distintas alternativas y modelos de explicación causal. En concreto, es posible ofrecer modelos o explicaciones causales de las correlaciones EPR. El mismo Salmon sabiamente dejó una puerta abierta a esta posibilidad:

“Sería prematuro, creo, concluir que una explicación de la mecánica cuántica es completamente imposible. [...] La naturaleza y el papel de la causalidad en la microfísica es una cuestión de difícil evaluación”.¹⁷

3. Modelos Causales para las Correlaciones EPR

Regresemos ahora a nuestro tema inicial de debate – las correlaciones EPR – tal y como se describen gráficamente mediante el diagrama espaciotemporal de la figura 4.1. En principio se pueden dar dos tipos de explicaciones causales de las correlaciones entre los sucesos de tipo *A* y *B*: una relación causal directa entre *A* y *B*; o una estructura de causa común *C* que subyace a tal correlación.

3.1. Modelos de Causa Directa:

¹⁵ Salmon (ibid, p. 256).

¹⁶ Durante el congreso de Barcelona Chris Hitchcock me recordó que Salmon ofrece un argumento adicional en defensa de esta problemática conclusión, relacionado con la conservación remota de espín en EPR – véase Salmon (1984, pp. 256-9). En mi opinión, lo que está haciendo Salmon en esas páginas es diagnosticar y explicitar con mayor precisión la dificultad para su teoría que resulta del argumento de Van Fraassen.

¹⁷ Salmon (ibid, pp. 254-5).

Estos modelos asumen que el suceso-resultado en un ala del experimento (s_1) es una causa directa parcial del suceso-resultado en la otra parte del experimento (s_2):

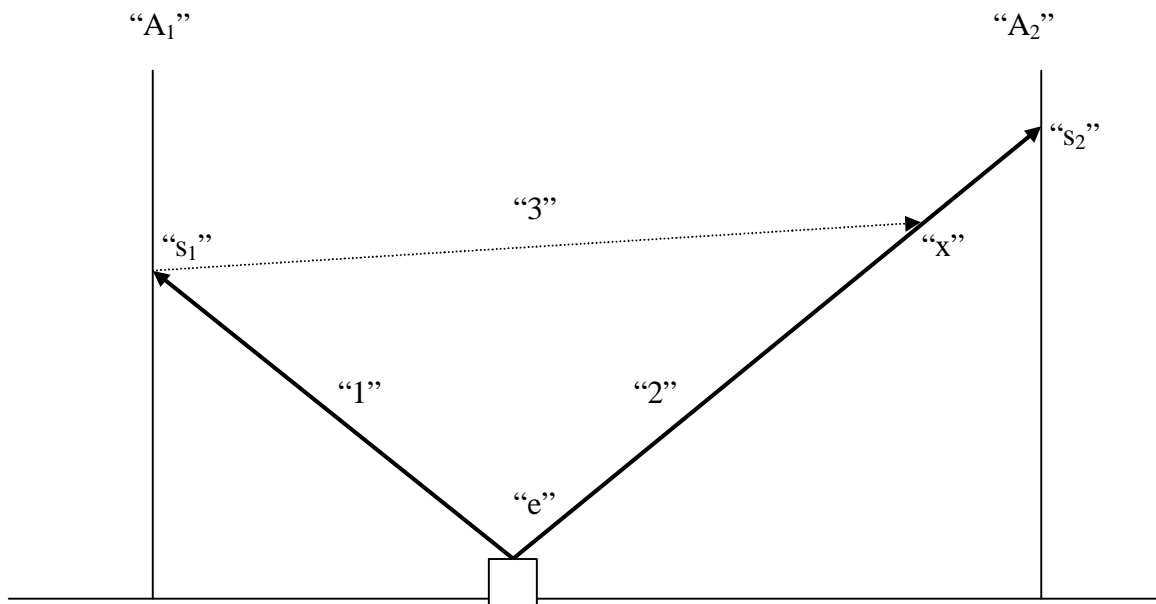


Figura 2.

En este diagrama las trayectorias de los aparatos de medición vienen dadas por las líneas A_1 y A_2 , las de las partículas por “1” y “2” y la trayectoria comprendida entre s_1 y x es un proceso causal directo entre las alas del experimento. s_1 , s_2 , x y e denotan sucesos-tipo, donde e es el suceso de emisión de las partículas y s_1 y s_2 son los sucesos-resultado de las mediciones del estado de la partícula “1” por el aparato A_1 y de la partícula “2” por el aparato A_2 , respectivamente. x es el suceso de recepción por la partícula “2” de la influencia causal emitida por la partícula “1”, y constituye una causa parcial del resultado s_2 .

El modelo obedece las condiciones para explicación causal impuestas por la teoría de Salmon de 1984. La explicación de la correlación entre s_1 y s_2 viene dada por cuatro interacciones causales y cinco causas parciales (eventos-tipo que constituyen una contribución necesaria a la correlación resultante):

“ e ”: Interacción- ψ que produce las dos partículas en estado ψ .

“ s_1 ”₁: Interacción- λ entre el aparato “ A_1 ” y la partícula “1” que resulta en: i) suceso-resultado “1”, y ii) emisión de la influencia causal “3”.

“ x ”₂: Interacción- λ entre la influencia causal “3” y la partícula “2” que cambia el estado de esta partícula.

“ s_2 ”₂: Interacción- λ entre la partícula “2” y el aparato de medición “ A_2 ”, que resulta en un suceso-resultado s_2 .

“e”: causa común parcial de s_1 y de x .

“A₁”: causa parcial de s_1 .

“A₂”: causa parcial de s_2 .

“s₁”: causa parcial de x .

“x”: causa parcial de s_2 .

3.2. Modelos de Causa Común:

Existe otro tipo de modelo causal, en el que se asume que la explicación causal de la correlación entre los sucesos s_1 y s_2 no es el resultado de una influencia causal directa sino que viene dada por una causa común “ c ”. Esta se encuentra conectada mediante una serie de procesos causales con ambos sucesos, que cumplen los siguientes requisitos:

- i) La causa común c es el suceso de creación de ambas partículas en la fuente de emisión,
- ii) Esta causa común se encuentra en el cono de luz pasado de ambos sucesos s_1 y s_2 ,
- iii) Los sucesos c , s_1 y s_2 forman un fork conjuntivo – es decir, c apantalla (“screens off”) s_1 de s_2 : $P(s_1 \& s_2 / c) = P(s_1 / c) P(s_2 / c)$.
- iv) La influencia de c sobre s_1 y s_2 es transmitida por las partículas mismas a lo largo de sus trayectorias.

De manera gráfica se puede ilustrar el modelo de causa común que se presupone mediante el siguiente diagrama:

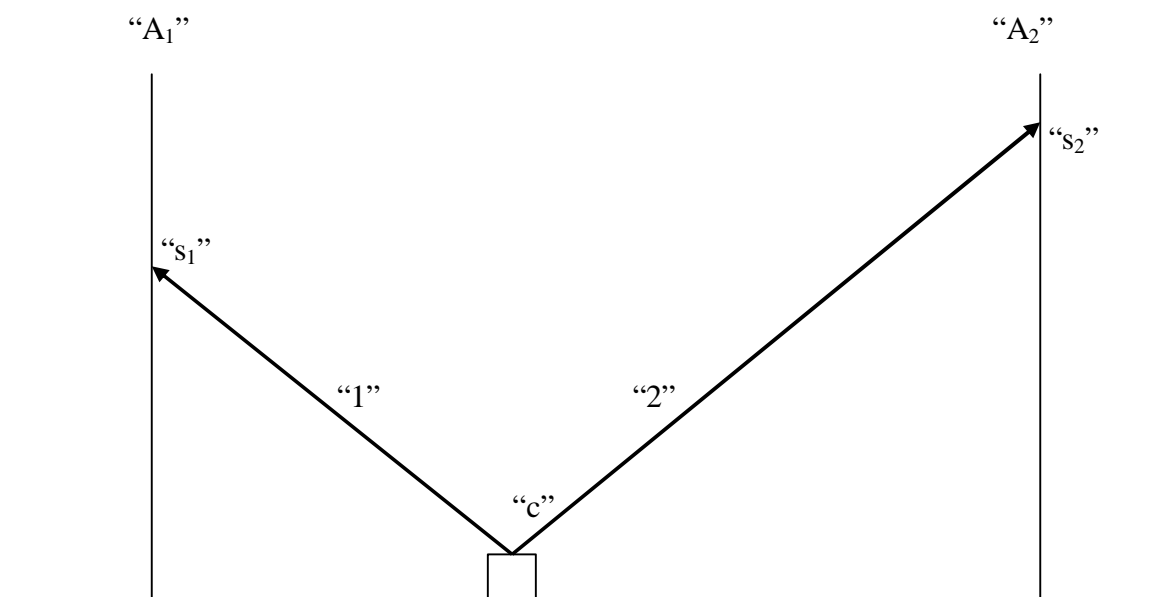


Figura 3

En este diagrama las trayectorias de los aparatos de medición vienen dadas por las líneas A_1 y A_2 , las de las partículas por “1” y “2”, que a su vez representan los procesos causales que transmiten la correspondiente marca. s_1 , s_2 y c denotan sucesos-tipo, donde “ c ” es el suceso de emisión de las partículas y al mismo tiempo causa común parcial de s_1 y s_2 , que como en el caso anterior denotan los sucesos-resultado de las mediciones del estado de la partícula “1” por el aparato A_1 y de la partícula “2” por el aparato A_2 , respectivamente.

Este modelo también obedece las condiciones de la teoría de Salmon de 1984. La explicación de la correlación entre s_1 y s_2 viene dada por tres interacciones causales y tres causas parciales (eventos-tipo que constituyen una contribución necesaria a la correlación resultante).

“ c ”: interacción- λ que genera en el evento fuente c dos partículas en estado ψ .

“ s_1 ”: interacción- λ entre el aparato de medición “ A_1 ” y la partícula “1” que resulta en el suceso-resultado s_1 .

“ s_2 ”: interacción- λ entre el aparato de medición “ A_2 ” y la partícula “2” que resulta en el suceso-resultado s_2 .

c : evento-tipo que constituye una causa parcial común de s_1 y s_2 ,

A_1 : causa parcial de s_1 .

A_2 : causa parcial de s_2 .

4. Argumentos en contra los Modelos Causales de EPR.

Hemos comprobado que, en principio, existen dos tipos de modelos causales que pueden explicar las correlaciones EPR de acuerdo con los requisitos de la teoría de Salmon. Sin embargo ya vimos en la segunda sección que Salmon expresa un fuerte y sentido pesimismo por cualquier tipo de mecanismo causal para las correlaciones EPR. ¿Qué subyace entonces al pesimismo de Salmon? En esta sección me propongo presentar de manera muy escueta y resumida los aspectos principales de los argumentos más importantes que se han desarrollado en contra de tales modelos causales para las correlaciones EPR. Mi presentación en este artículo se centra en particular sobre el argumento desarrollado por Van Fraassen; este es el argumento más citado por el mismo Salmon. En la sección posterior daré respuesta a estos argumentos, indicando algunas de las alternativas que se nos ofrecen para defender la teoría de Salmon.

4.1. La Objeción Relativista en Contra del Modelo de Causa Directa

La objeción más importante en contra del modelo de causa directa está relacionada con la teoría especial de la relatividad. Salmon se apoya en el argumento de Van Fraassen para rechazar cualquier modelo de causa directa (Van Fraassen clasifica estos modelos como intentos de “*explicación por coordinación*”). El argumento de Van Fraassen en contra de los modelos de causa directa es una muy breve alusión al carácter súper lumínico de la velocidad de la influencia causal (representada por la línea de mundo “3” en la figura 2):¹⁸

“Por *coordinación* entiendo una correspondencia llevada a cabo por señales (en un sentido amplio): algo de energía o materia se debe desplazar de una localidad a otra, y debe actuar como un factor parcial en la producción del suceso correspondiente. La situación no tiene por qué ser determinista – al contrario, sería indeterminista si no es seguro que la señal será emitida, o si siendo emitida su efecto puede no darse. Pero la palabra “desplazar” debe tomarse con propiedad. Por eso esta explicación no puede ser válida para los sucesos conectados espacialmente (“*spacelike*”). Hablar de desplazamiento instantáneo entre X e Y es una metáfora confusa o incoherente, puesto que la entidad en cuestión debe ya encontrarse simultáneamente en X e Y – en cuyo caso no hay necesidad de desplazamiento, puesto que se encuentra ya en su destino”.

Veamos en qué consiste precisamente este argumento. Como ya hemos visto la figura 2 representa una conexión causal entre las dos alas del experimento de EPR. Pero ya vimos con anterioridad que en el experimento típico EPR los sucesos-resultado s_1 y s_2 están conectados espacialmente, o sea que la influencia causal “3” debe viajar al menos durante un intervalo finito de su recorrido con velocidad superior a la de la luz. Supongamos que la trayectoria es exactamente la que aparece en la figura 2, con la recepción en x de la influencia causal algunos instantes después de su emisión en s_1 en el marco de referencia con respecto al que el laboratorio está en reposo.

Es un hecho de sobras conocido que el orden temporal de dos eventos conectados espacialmente no es absoluto ni independiente del marco de referencia, en la teoría especial de la relatividad. Según la teoría especial de la relatividad, cualquier marco inercial en movimiento con respecto al laboratorio debe ser igualmente válido para la descripción del mecanismo causal que explica las correlaciones entre s_1 y s_2 . Existirán por lo tanto marcos inerciales, válidos como sistema de referencia, desde cuya perspectiva el mecanismo causal tendrá una apariencia un tanto distinta. Por ejemplo existirán marcos inerciales en los que el intervalo de tiempo que transcurre entre los sucesos “ s_1 ” y “ x ” es superior al que transcurre entre estos sucesos según el marco de referencia en el que el laboratorio se encuentra en reposo:

¹⁸ Van Fraassen (1982, en su versión aumentada y corregida de 1989, p. 112)

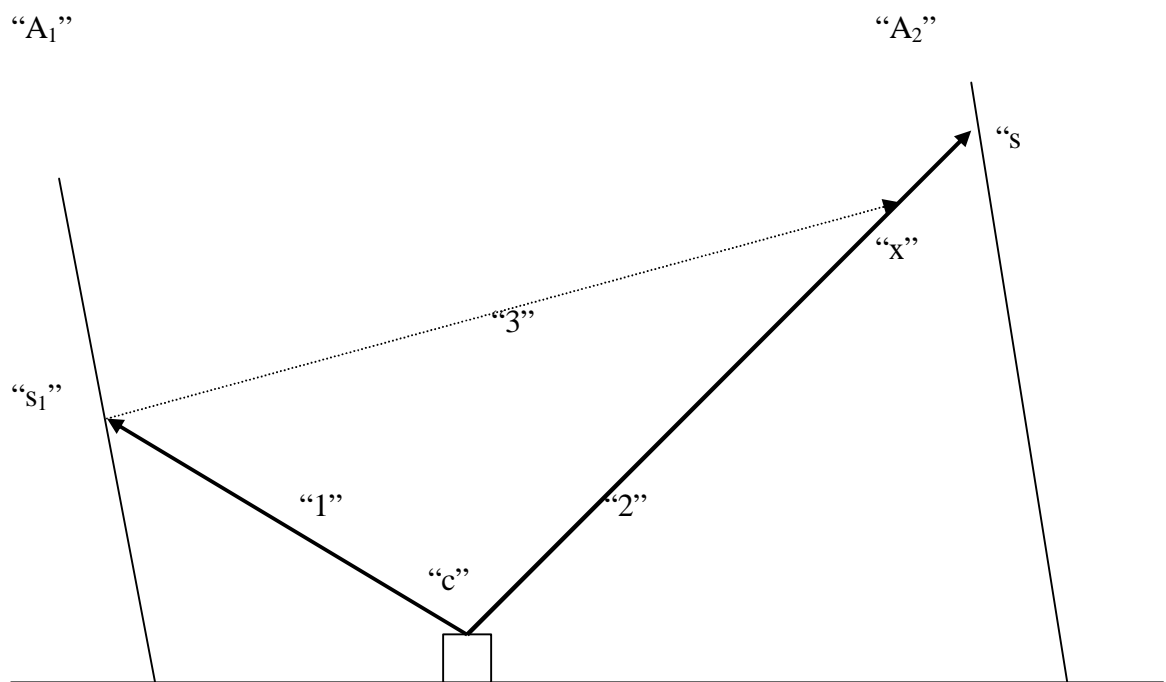


Figura 4.

Sin embargo existen otros marcos de referencia inerciales, igualmente válidos para la descripción de los sucesos físicos, en los que el suceso s_1 parecerá ocurrir *después* del suceso x :

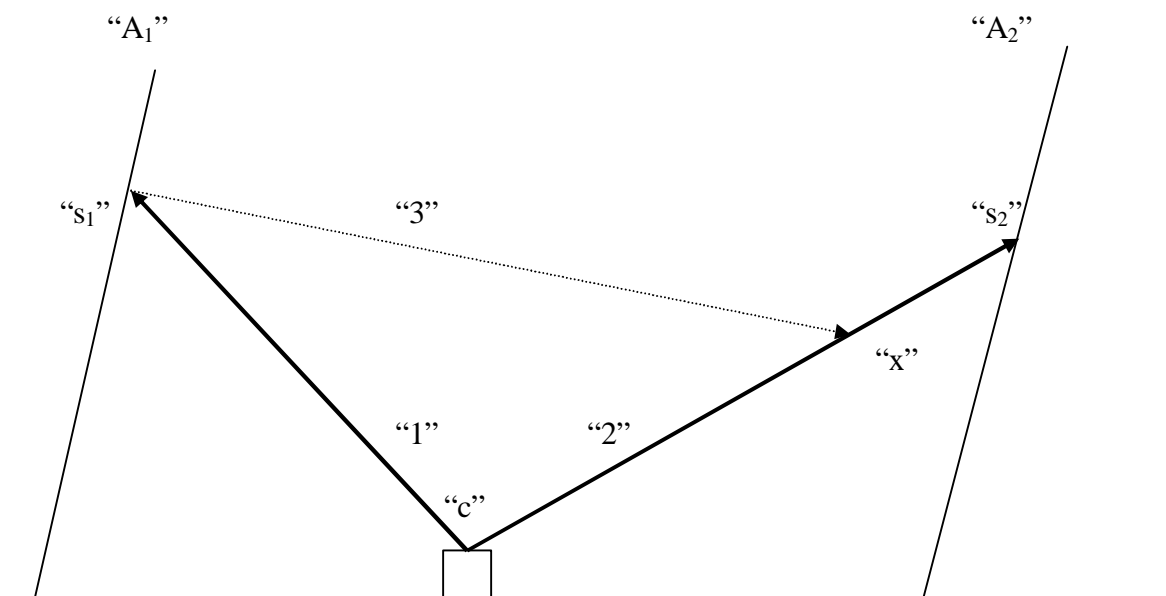


Figura 5.

La existencia de dos marcos de referencia que invierten el orden temporal de la señal también implica la existencia de un marco de referencia intermedio en el que la recepción de la influencia causal es instantánea:

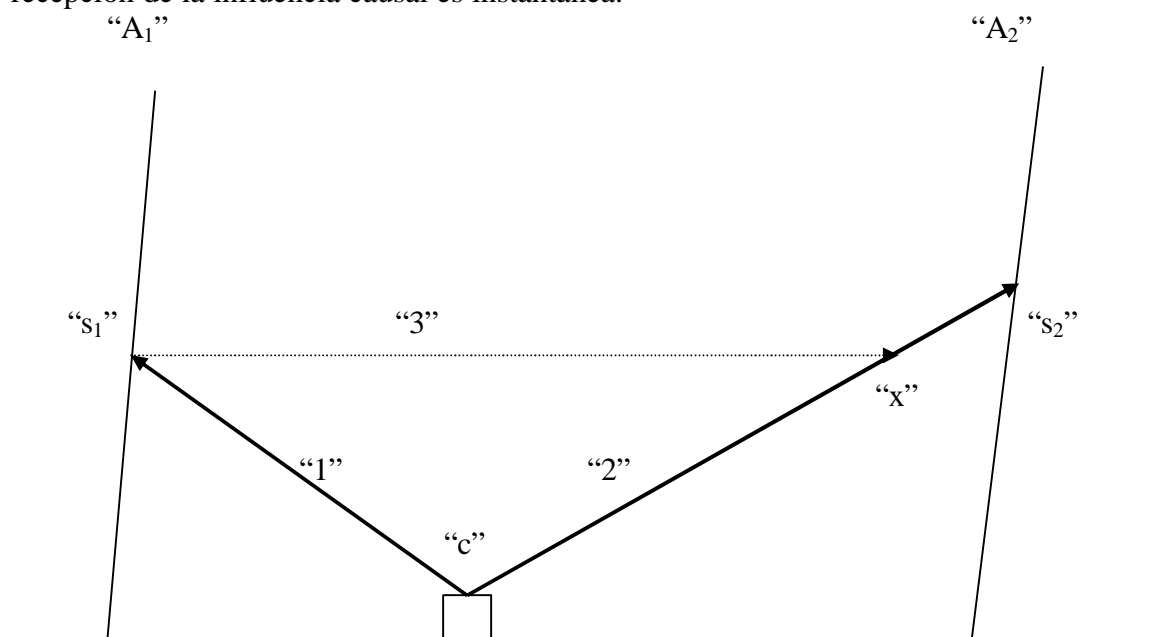


Figura 6.

Este es el escenario preocupante para Van Fraassen puesto que implica, según Van Fraassen, una incoherente coexistencia simultánea de la causa y el efecto.

4.2. El Argumento de Van Fraassen en contra de los Modelos de Causa Común

El argumento de Van Fraassen en contra de los modelos de causa directa es, como acabamos de ver, extraordinariamente breve. La mayor parte del artículo de 1982 está dirigido a rebatir la posibilidad de un modelo de causa común, del tipo mostrado en la Figura 3. El argumento de Van Fraassen está basado en la idea seminal de Reichenbach, el llamado *principio de la causa común*, que éste enuncia de la siguiente manera: “Si ha tenido lugar una coincidencia improbable, entonces debe existir una causa común”.¹⁹

En relación con este principio dos comentarios parecen necesarios. Primero, por “improbable” Reichenbach no entiende simplemente una coincidencia con una baja probabilidad. Más bien lo que tiene en mente es lo siguiente: una coincidencia entre dos tipos de suceso *A* y *B* es improbable, si no tenemos razón alguna para suponer que tienen dependencia mutua causal directa, es decir no tenemos razón alguna para suponer que *A* causa *B*, o *B* causa *A*. El segundo comentario es que, según Reichenbach, no es cierto que una coincidencia sea genuina si y sólo si es *de ley* (“lawlike”), en el sentido metafísico del término. Al contrario para Reichenbach, una coincidencia es genuina si es un ejemplo de una correlación estadística establecida por métodos empíricos, entre dos tipos de sucesos.

¹⁹ Reichenbach, 1956, p. 157 ff.

Las correlaciones EPR satisfacen tales requisitos plenamente puesto que están verificadas experimentalmente y además son una predicción exacta de la mecánica cuántica. La coincidencia improbable no es otra que la correlación estadística entre los sucesos-resultado de las mediciones de espín en cada ala del experimento:

$$prob(s_1 \& s_2) > prob(s_1)prob(s_2).$$

El argumento de Van Fraassen introduce una complejidad adicional, puesto que considera la posibilidad de resultados de mediciones realizadas sobre las partículas en direcciones diferentes de espín. El experimentador debe seleccionar la dirección de la medición del espín en cada partícula, que no tiene por qué ser la misma en ambos casos. Supongamos que la dirección de la medición sobre la primera partícula viene dada por un cierto ángulo sobre la vertical θ , y la dirección de medición sobre la segunda partícula por θ' . Van Fraassen denota el suceso de la selección por parte del investigador de la dirección de medición sobre la primera partícula como “ a ” y el suceso de la selección de la dirección de medición sobre la segunda como “ b ”. Es obvio que, en todos los marcos de referencia, a precede a s_1 , y b precede a s_2 .

El objetivo del argumento de Van Fraassen es demostrar que las desigualdades de Bell, y su violación experimental, implican que un modelo de causa común para las correlaciones EPR es imposible. La condición indispensable para derivar las desigualdades de Bell es la llamada condición de factorizabilidad (“factorizability”) empleada por Bell como una condición de “localidad”.²⁰

“Factorizabilidad”:

$$prob(s_1 \& s_2 / a \& b \& \Psi) = prob(s_1 / a \& \Psi)prob(s_2 / b \& \Psi).$$

Van Fraassen analiza esta condición como una conjunción de tres condiciones lógicamente independientes, que denomina “causalidad”, “localidad oculta”, y “autonomía oculta”, y que define de la siguiente manera:

“Causalidad”:

$$prob(s_1 / s_2 \& a \& b \& \Psi) = prob(s_1 / a \& b \& \Psi),$$

$$prob(s_2 / s_1 \& a \& b \& \Psi) = prob(s_2 / a \& b \& \Psi).$$

Esta condición es una aplicación directa de la condición de screening off de Reichenbach. La idea es que el suceso compuesto ($a \& b \& \mathbf{y}$) hace estadísticamente irrelevante la presencia o no del suceso s_2 para la probabilidad de s_1 , y viceversa. Y ya hemos visto que de acuerdo con Reichenbach y Salmon, screening off es una condición necesaria para que se dé un fork conjuntivo. Según este punto de vista si

²⁰ Bell (1964, pp. 195-6), en Wheeler and Zurek (1983, pp. 403-4.). La identificación que hace Bell de la condición de factorizabilidad estadística con una condición de localidad *física* ha sido objeto de un fascinante debate y es objeto de controversia – véase (Suárez, 2000). La terminología de Van Fraassen es igualmente controvertida puesto que sus términos (“causalidad”, “autonomía”, “localidad”) sugieren hechos físicos o causales, cuando en realidad las condiciones de verdad de estas expresiones son estrictamente probabilísticas.

esta condición no se satisface la conjunción ($a \& b \& y$) no puede ser una causa común del tipo conjuntivo.

“Localidad Oculta”:

$$\begin{aligned} \text{prob}(s_1/a \& b \& \Psi) &= \text{prob}(s_1/a \& \Psi), \\ \text{prob}(s_2/a \& b \& \Psi) &= \text{prob}(s_2/b \& \Psi). \end{aligned}$$

Esta condición es también una condición del tipo screening off, en la que la conjunción del estado de las dos partículas ψ con el suceso de selección de dirección de medición en el ala próxima del experimento hace que la selección de la dirección de medición del aparato en el ala opuesta sea irrelevante estadísticamente para determinar la probabilidad del suceso-resultado en el ala próxima.

“Autonomía Oculta”:

$$\text{prob}(\Psi/a \& b) = \text{prob}(\Psi).$$

Esta condición simplemente establece que la probabilidad de que las partículas se encuentren en un estado determinado ψ en el momento de su emisión es independiente de la selección de las direcciones de medición de ambos aparatos.

Van Fraassen demuestra que la conjunción de *causalidad*, *localidad oculta* y *autonomía oculta* implica la condición de *factorizabilidad* y da pie a las desigualdades de Bell, que a su vez contradicen tanto las predicciones de la mecánica cuántica como los resultados experimentales. Puesto que las desigualdades de Bell se han demostrado falsas, alguna de estas tres condiciones (o una combinación lógica de estas) debe ser falsa.

Van Fraassen presenta el siguiente argumento en contra de la condición por él denominada *causalidad*:²¹

“Si la probabilidad de un resultado [en un ala del experimento] depende no solamente de la causa común hipotética, sino también de lo que ocurre [en la otra ala del experimento], o si el carácter mismo de la hipotética causa común depende de qué configuración experimental se seleccione (después de que la fuente haya emitido las partículas) entonces, en mi opinión, los sucesos-resultado no han sido referidos a una causa común pasada que explique su correlación.”

En otras palabras, de acuerdo con Van Fraassen, pueden existir modelos de causa común de las correlaciones, en los que *localidad oculta* o *autonomía oculta* sean falsas, pero tales modelos no podrían explicar las correlaciones. Si por otro lado, la condición de *causalidad* hierra, entonces no puede ni siquiera darse un modelo de causa común, no digamos ya uno con carácter explicativo, puesto que esta condición expresa el requisito del principio de causa común de Reichenbach. Van Fraassen procede a aducir en contra de la condición de *causalidad* que el estado de las dos

²¹ Van Fraassen (1982, en su versión corregida y aumentada de 1989, p. 105).

partículas en el momento de emisión no es un *screening off* de los sucesos-resultado. Supongamos, sin pérdida de generalidad, que $a = b = \theta$. Entonces, *causalidad* se reduce a:

$$\begin{aligned} \text{prob}(s_1/s_2 \ \& \ \Psi) &= \text{prob}(s_1/\Psi), \\ \text{prob}(s_2/s_1 \ \& \ \Psi) &= \text{prob}(s_2/\Psi). \end{aligned}$$

Y esta condición es claramente falsa, puesto que según la mecánica cuántica:

$$\begin{aligned} \text{prob}(s_1/s_2 \ \& \ \Psi) &= 1 \neq \text{prob}(s_1/\Psi) = 1/2, \\ \text{prob}(s_2/s_1 \ \& \ \Psi) &= 1 \neq \text{prob}(s_2/\Psi) = 1/2. \end{aligned}$$

Van Fraassen concluye así que un modelo de causa común no es posible para las correlaciones EPR: ²²

“La conclusión es inevitable: existen fenómenos bien confirmados que no pueden enmarcarse (“can not be embedded”) en ningún modelo de causa común”.

5. Respuestas y Alternativas

Mi exposición del argumento de Van Fraassen está en la práctica dirigida hacia una conclusión particular. En concreto la exposición de los argumentos en contra de los modelos causales de EPR en la sección anterior ya anticipa varias de las posibles réplicas. En esta sección me limito a apuntar con mayor precisión algunas alternativas viables. Dejo para un trabajo posterior el desarrollo de estas alternativas como modelos causales concretos. La conclusión que persigo demostrar es que ninguno de estos dos tipos de modelos (causa directa o causa común) han sido refutados. Esto no significa que estemos en posición de aportar una prueba de que alguno de estos modelos es una descripción literal y verdadera de los mecanismos causales que generan las correlaciones EPR; significa solamente que no existe prueba de lo contrario, a pesar del argumento de Van Fraassen. En mi opinión esta conclusión no es particularmente revolucionaria, ni debe sorprendernos: en general los modelos causales entran dentro de las interpretaciones metafísicas de los fenómenos físicos; y no puede extrañar que tales interpretaciones estén infra-determinadas por los resultados empíricos, i.e. por las correlaciones estadísticas entre magnitudes observables o susceptibles de medición.

5.1. A favor de los Modelos de Causa Directa

Existen al menos tres alternativas al argumento relativista contra los modelos de causa directa. La primera insiste en que la influencia causal no requiere sustrato material; la segunda considera la posibilidad de que los fenómenos cuánticos no sean invariantes

²² Van Fraassen (1982, en la versión 1989, p. 108).

de las transformaciones de Lorentz de la teoría especial de la relatividad; la tercera opción plantea la posibilidad de que las causas se transmitan hacia atrás en el tiempo.

5.1.1. La influencia causal puede no tener sustrato material

La primera opción parte de la siguiente observación al argumento de Van Fraassen. Es cierto que en un marco de referencia determinado la influencia causal directa entre las dos alas del experimento (véase figura 6) es instantánea. Sin embargo, una influencia causal instantánea no es necesariamente incoherente. Es cierto, como afirma Van Fraassen, que si un objeto físico pudiese estar en dos posiciones espaciales diferentes al mismo tiempo, no tendría sentido suponer la necesidad de un desplazamiento de un punto al otro. Pero el modelo de causa directa no afirma que se produzca un desplazamiento de un sistema *material* o *físico* de una parte del experimento a la otra. La influencia causal se traslada de un punto a otro: esto no implica que una misma partícula física se encuentre en dos posiciones al mismo tiempo – a menos, claro está, que la influencia causal sólo pueda transmitirse mediante el desplazamiento material de un sistema físico.

Existen varias teorías de la causalidad, sofisticadas y harto conocidas hoy en día, que no requieren un sustrato material para la influencia causal.²³ Y de hecho en estas teorías no solamente es posible la “transmisión instantánea de influencia causal”, sino que es deseable (es cierto que estas teorías no utilizan los términos “transmisión”, o “influencia”, para evitar la connotación física). En años recientes se han desarrollado varios argumentos, a mi forma de ver convincentes, a favor de la conclusión, específica con respecto a la mecánica cuántica, de que la influencia causal que puede estar presente en EPR no tiene por qué transmitirse a través de ningún sustrato material.²⁴

En definitiva, la primera alternativa consiste en negar que la influencia causal requiera una transmisión de energía o materia a velocidad superior a la de la luz. La relación de causalidad no tiene por qué ser una relación física. En tal caso el argumento de Van Fraassen, basado en la imposibilidad de desplazamiento físico instantáneo no tendría consecuencias. (Esta opción permitiría además insistir en la compatibilidad del modelo de causa directa con la teoría de la relatividad especial). Sin embargo, debe admitirse que el modelo de causa directa interpretado de esta forma no sería un modelo causal según la teoría de Salmon. La teoría de Salmon no es una teoría contra fáctica de la causalidad, sino una teoría física, que sí aspira a encontrar un sustrato material – un proceso causal – que constituya toda transmisión de influencia causal.

5.1.2. Los procesos causales cuánticos pueden no ser relativistas

La segunda alternativa a la que he hecho referencia consiste en negar que los procesos causales del modelo causal que explica las correlaciones de tipo EPR deban ser invariantes de las transformaciones de Lorentz. ¿Por qué suponer que los procesos cuánticos deben también obedecer la teoría especial de la relatividad? Existen de hecho varias interpretaciones de la mecánica cuántica que no tienen dificultad en abandonar el requisito de invariancia relativística al nivel ontológico o causal. Un

²³ Quizás la más conocida entre estas teorías sea el análisis contra fáctico de la causalidad de David Lewis (1986). Psillos (2002, capítulo 3) es una introducción clara y concisa.

²⁴ Maudlin (1995, capítulo 5) es una excelente defensa de este punto de vista.

caso muy conocido es el de la teoría de Bohm, cuyas ecuaciones de onda (correspondientes al llamado “campo cuántico”) no son invariantes de las transformaciones de Lorentz.²⁵ Otro caso ya bastante debatido y establecido es el de la interpretación modal, que postula transiciones estocásticas entre lo que se conoce como valores-estado (“value states”), que no son ni pueden ser invariantes de las transformaciones de Lorentz.²⁶

Si abandonamos el compromiso con la invariancia de Lorentz podemos pasar a suponer que el proceso causal que conecta ambas alas del experimento determina un marco de referencia inercial privilegiado; cualquier otro marco de referencia sería ficticio. En la terminología utilizada por Jim Cushing (1995), la teoría de la relatividad sería una teoría fenomenológica, no fundamental, con respecto a los procesos causales cuánticos. Las frecuencias estadísticas de los experimentos EPR, incluidas las correlaciones, serían invariantes de las transformaciones de Lorentz, pero no así los procesos causales que las explican. La determinación del marco de referencia privilegiado pasaría a ser una convención. Provisionalmente podríamos estipular que el marco de referencia privilegiado es aquél en el que el primer aparato de medición está en reposo, que corresponde con la figura 2. No parece existir ninguna razón, desde la perspectiva de la teoría de la explicación causal de Salmon, para excluir esta segunda posibilidad.

5.1.3. Los procesos pueden ser relativistas, pero se transmiten hacia atrás en el tiempo

La tercera alternativa consistiría en insistir en la invariancia de Lorentz de los procesos causales cuánticos, y aceptar plena y abiertamente sus consecuencias. La consecuencia principal es, como ya hemos visto, la existencia de un marco de referencia en los que la influencia causal es instantánea (figura 6) y de otros marcos en los que la influencia se transmitiría hacia atrás en el tiempo (figura 5).

Consideremos ambas dificultades sucesivamente. La primera dificultad entraña la incoherencia a la que hace referencia Van Fraassen. ¿Pero qué tipo de incoherencia es ésta? Aceptemos que los términos “transmisión” e “influencia” no parecen ser aplicables en este caso. La teoría de la relatividad implicaría que la transmisión de influencia causal, y su dirección, no es un hecho físico objetivo de la situación, puesto que son dependientes del marco. Pero esto no implica que tampoco sea objetiva la existencia de un proceso causal entre los dos sucesos-resultado, tal y como lo define Salmon. Al contrario, sigue siendo cierto en este marco de referencia que existe una línea de mundo en el espaciotiempo cuatridimensional que “transmite” una marca, en el sentido técnico de “transmitir una marca” que utiliza la teoría de Salmon, y que he mencionado en la sección segunda de este artículo. Tendríamos en tal marco de referencia un proceso causal perfectamente legítimo – lo que no sería legítimo es describirlo como la “transmisión” física de “influencia” causal en el sentido habitual de estos términos.

²⁵ Véase Cushing (1995), quien también introduce la distinción entre invariancia fundamental e invariancia fenomenológica. Según Cushing, la teoría de Bohm está comprometida con una lectura de la teoría especial de la relatividad como teoría fenomenológica, pero no ontológica. Esta lectura se ajusta muy bien a mi segunda propuesta alternativa de interpretación del modelo de causa directa.

²⁶ Véase Dickson and Clifton (1998).

La segunda dificultad que aflige a esta interpretación del modelo de causa directa es la implicación de que, en otros marcos de referencia, la influencia causal viajaría hacia atrás en el tiempo. Ciertamente tal implicación entraña complicaciones, que pueden constituir dificultades para esta, tercera, alternativa. Pero no parece que pudiesen en ningún caso constituir una refutación. Para empezar hace ya años que los argumentos tradicionales en contra de la causalidad hacia atrás en el tiempo han sido rebatidos.²⁷ Y, para colmo, varios modelos causales de las correlaciones causales EPR que hacen uso explícito de esta posibilidad se encuentran en distintos grados de desarrollo en la actualidad. Estos modelos van incluso más allá que la alternativa presentada aquí, puesto que hacen uso de la causalidad hacia atrás en el tiempo, *en el marco de referencia más familiar*: el marco con respecto al que el mismo laboratorio, y los aparatos de medición se encuentran en reposo.²⁸

Es posible que estos modelos, que utilizan la hipótesis de la causalidad hacia atrás en el tiempo, acaben demostrándose poco plausibles o extravagantes; pero no parece que una refutación empírica de estos modelos sea una empresa posible. (En mi opinión, estos modelos son tan plausibles como cualquier otro modelo o interpretación actualmente debatidos de la mecánica cuántica; y serían en cualquier caso al menos tan plausibles como la hipótesis según la cual las correlaciones son hechos brutos de la naturaleza, carentes de explicación alguna). Parece perfectamente posible explicar las correlaciones mediante procesos causales que, por lo demás, se ajustan plenamente a los requisitos de la teoría de Salmon.

5.2. A Favor de los Modelos de Causa Común

Repasemos brevemente el argumento de Van Fraassen en contra de modelos de causa común. Su primera premisa parece ser (Pr1): *Localidad oculta y autonomía oculta* podrían ser falsas en un modelo de causa común, pero tal modelo no explicaría las correlaciones. Las otras premisas son (Pr2): causalidad debe necesariamente ser verdadera en un modelo de causa común, sea o no explicativo; y (Pr3): La misma refutación experimental de las desigualdades de Bell nos dice que *causalidad* es falsa. A partir de estas premisas Van Fraassen deduce la conclusión de que no existen modelos explicativos de causa común de las correlaciones EPR.

Este argumento, incluso si resulta ser válido, no es convincente, puesto que las premisas son controvertidas y, en particular, la premisa (Pr1) parece ser claramente falsa. Ya vimos que los modelos de causa común, que Van Fraassen considera y desestima, realizan varias suposiciones de partida (suposiciones (i-iv) en la sección 3.2). Van Fraassen no hace explícitas al menos tres de estas suposiciones (la suposición (iii) está explicitada en la medida en la que se requiere explícitamente que cualquier causa común debe ser un *screener off* de sus efectos). Sin embargo, ninguna de estas suposiciones es equivalente a – o consecuencia lógica de – los requisitos generales que establece la teoría de Salmon para una explicación causal. Surge así la

²⁷ Por, entre otros, Dummett (1954) y Horwich (1987).

²⁸ Costa de Beauregard (1977) es uno de los primeros modelos de EPR este tipo. En la actualidad el modelo de este tipo más conocido y debatido es el de Huw Price (1996, capítulo 9), en el que el suceso de selección de la dirección de medición en cada ala del experimento es una causa del estado de las partículas en el momento de emisión. (Como punto más adelante, este modelo viola la condición denominada por Van Fraassen *autonomía oculta*).

pregunta: ¿Es posible construir modelos causales de EPR que, satisfaciendo los requisitos de la teoría de Salmon, no satisfagan sin embargo alguna de estas suposiciones adicionales? Pasemos a examinar detalladamente las distintas posibilidades:

5.2.1. La causa común puede no ser un fork conjuntivo

Comencemos por la suposición (iii), que además de ser la única explícitamente reconocida por Van Fraassen es la más controvertida. Van Fraassen insiste, en la línea de Reichenbach, en que cualquier causa común C de dos efectos correlacionados A y B debe obedecer la condición de *screening off*:

$$P(A \& B / C) = P(A / C) P(B / C)$$

Según Reichenbach y Van Fraassen, *screening off* es una condición necesaria – aunque no suficiente – para una causa común. ¿Por qué? Ya hemos visto que el mismo Salmon contempla la posibilidad de que una causa común no constituya un *fork* conjuntivo sino interactivo. ¿Puede una causa común no satisfacer la condición de *screening off* con respecto a sus efectos? Algunos filósofos así lo piensan en el caso de causas genuinamente probabilísticas – por ejemplo, Nancy Cartwright.²⁹ El tema es en la actualidad el objeto de una interesante polémica, relacionada con lo que se denomina la condición causal de Markov, que ni podemos ni necesitamos abordar aquí.³⁰ Es suficiente mencionar que, si abandonamos el requisito de Reichenbach de *screening off*, la causa común de las correlaciones EPR podría ser el estado de las partículas en el momento de su emisión, exactamente la misma causa común que considera y rechaza Van Fraassen.³¹

5.2.2. La causa común puede no ser el suceso de emisión de las partículas

La suposición (i) también podría ser falsa – y el argumento de Van Fraassen consecuentemente inválido. Esto podría ocurrir si se diese una causa común que fuese algún suceso anterior al suceso de emisión de las partículas (por ejemplo el suceso de creación de la fuente de emisión, o el de la preparación de la fuente de partículas). Que yo sepa este tipo de modelo no ha sido nunca estudiado o propuesto. No resulta fácil entender por qué, puesto que constituye un modelo clásico de variables ocultas. Es más, como apunto a continuación, puede ser construido de tal forma que satisfaga las condiciones de *screening off*, como un *fork* conjuntivo clásico.

Quizás la razón por la que un modelo de este tipo aún no ha sido desarrollado radique en la dificultad de encontrar algún suceso d en el pasado propio de c , s_1 y s_2 que juegue el papel de causa común oculta. O quizás la razón tenga que ver con la sospecha de que si tal suceso o variable oculta fuese capaz de satisfacer las condiciones de Reichenbach, tendría necesariamente que satisfacer la condición de factorizabilidad, y estaría comprometida con las desigualdades de Bell. Este razonamiento no me parece convincente, por la siguiente razón. No parece existir razón alguna por la que, de existir esta causa común o variable oculta, tal causa no

²⁹ Cartwright (1988).

³⁰ Véase, por ejemplo, Hausman and Woodward (1999). Algunos de los temas debatidos están ya siendo aplicados a EPR – véase Hofer-Szabo, Redei and Szabo (1999).

³¹ Cartwright (1989, cap. 9) construye un modelo de este tipo.

podiese ser causa parcial de cada uno de los sucesos-resultado y *además* causa parcial de los sucesos de selección de la dirección de medición a y b (que aunque se encuentran fuera del cono de luz futuro de c , pueden sin embargo encontrarse dentro del cono de luz futuro de d). Además d podría ser causa parcial del suceso de emisión c que a su vez puede constituir una causa común parcial de los sucesos-resultado. Es decir, no parece existir ninguna razón para excluir una estructura causal compleja del siguiente tipo:

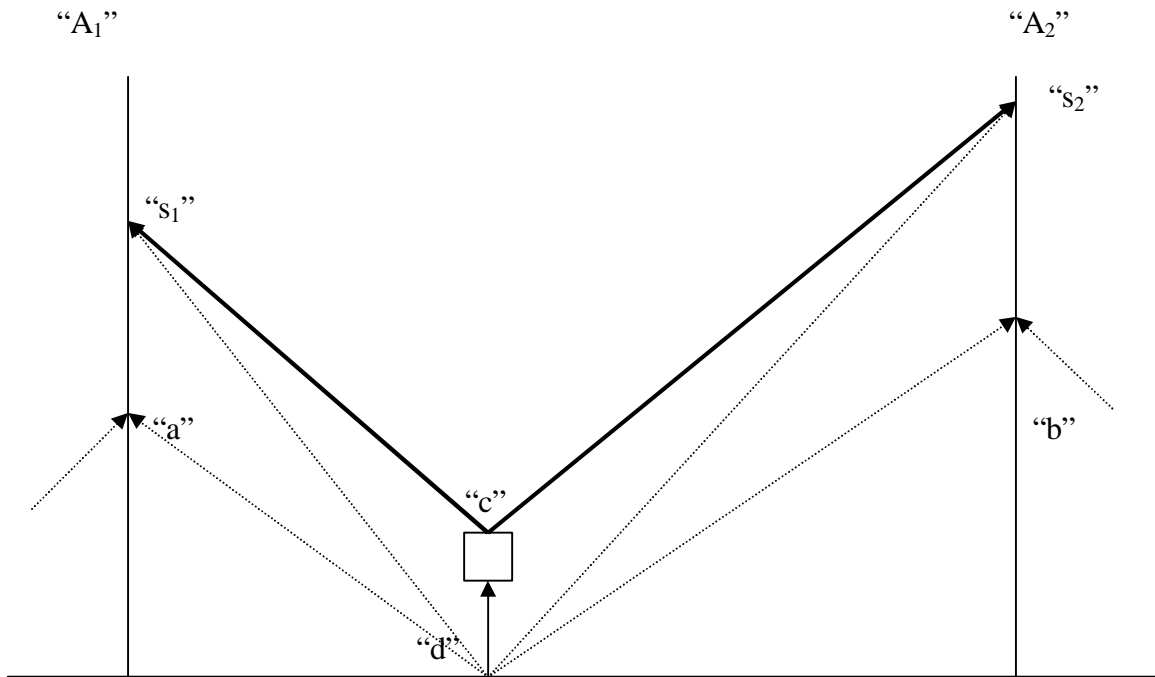


Figura 7.

En esta estructura causal: d es causa común parcial de c, a, b, s_1, s_2 ; c es causa común parcial de s_1, s_2 ; a es causa parcial de s_1 ; b es causa parcial de s_2 . Ninguna de las causas comunes tiene por qué ser un fork conjuntivo (en el caso de c , sabemos que no puede serlo), es decir:

$$\begin{aligned} \text{prob}(s_1 \& s_2 / c) &\neq \text{prob}(s_1 / c) \text{prob}(s_2 / c), \\ \text{prob}(s_1 \& s_2 / d) &\neq \text{prob}(s_1 / d) \text{prob}(s_2 / d). \end{aligned}$$

Sin embargo, la conjunción de ambas causas comunes podría o no serlo:

$$\text{prob}(s_1 \& s_2 / a \& b \& c \& d) = \text{prob}(s_1 / a \& c \& d) \text{prob}(s_2 / b \& c \& d).$$

En este caso, las desigualdades de Bell no son derivables con respecto a cada causa común aislada, incluso si lo fuesen con respecto a la conjunción lógica de ambas.³²

5.2.3. La causa común puede encontrarse fuera del cono de luz

La segunda suposición también puede ser falsa. La causa común puede no ser un suceso discreto y no tiene por qué encontrarse en el cono de luz pasado de s_1 y s_2 . En concreto la causa común puede ser el estado de las dos partículas en el instante anterior al primer suceso-resultado. Puesto que las dos partículas se encuentran separadas la una de la otra, la localización espaciotemporal del estado debe ser una hiper-superficie, o al menos una región (presumiblemente cerrada) de tal hiper-superficie, que englobe la posición física de ambas partículas.³³ Por ejemplo:

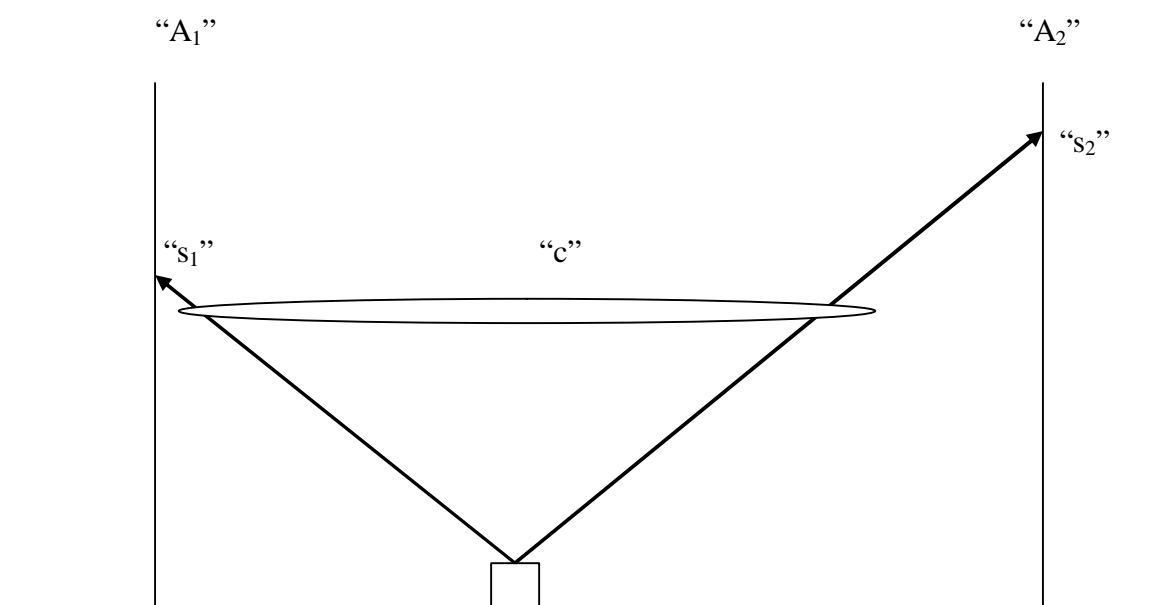


Figura 8.

5.2.4. La influencia causal puede no transmitirse con las partículas

La trayectoria de la influencia causal puede no corresponder con la de las partículas. Por ejemplo, es posible suponer que, incluso si la trayectoria de las partículas pudiese considerarse clásica y continua, la trayectoria de la influencia causal puede mostrar discontinuidades importantes en el espacio. No es necesario aquí abordar los detalles de esta opción.³⁴ Baste mencionar que tal suposición no es extraña a la historia de la mecánica cuántica. Más bien al contrario parece estar de acuerdo con el espíritu de la interpretación ortodoxa de la mecánica cuántica, la interpretación de Copenhague,

³² En otras palabras: la adecuación o inadecuación empírica de este modelo debe establecerse mediante argumentos diferentes a los aportados por Van Fraassen para excluir un modelo con el suceso c como causa común.

³³ Jeremy Butterfield (1989) ha explorado algunas de estas posibilidades.

³⁴ Un modelo de este tipo ha sido ya elaborado por Chang and Cartwright (1993) por lo que me limito a referir al lector a este artículo.

según la cual ni siquiera es legítimo adscribir a una partícula cuántica una trayectoria clásica o continua en el espaciotiempo.

5.2.5. La condición “autonomía oculta” puede ser falsa

Ya se ha mencionado (nota 28 a pié de página) que esta condición es falsa en los modelos de causa hacia atrás en el tiempo de Costa de Beauregard y Huw Price. En estos modelos (también llamados modelos de zigzag) la selección de la dirección de medición en cualquier ala causa un estado diferente inicial de las partículas:

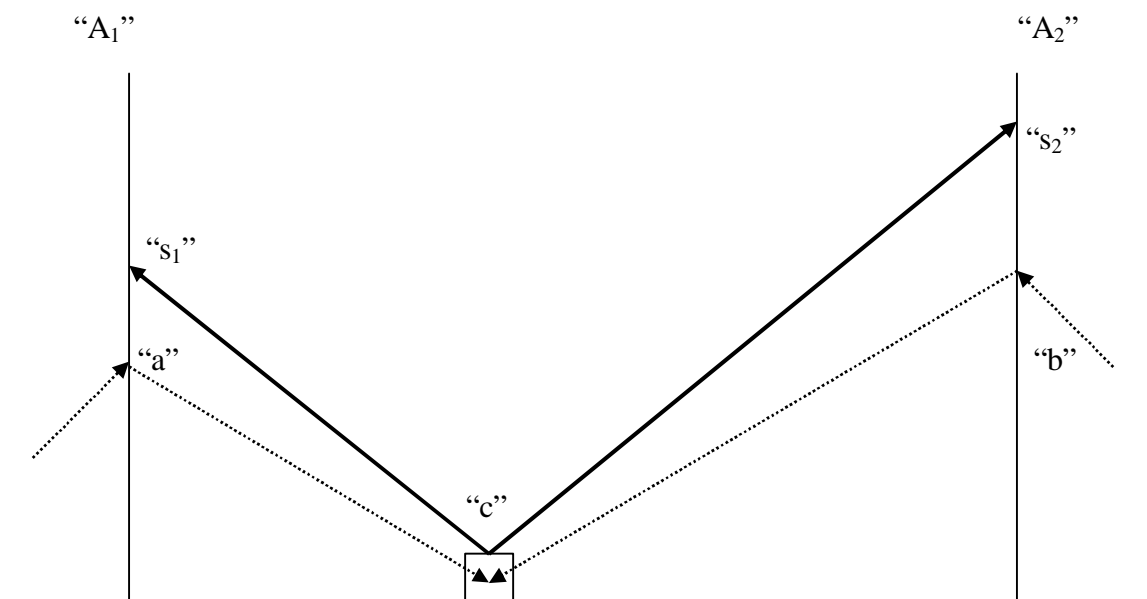


Figura 9.

Es decir existe una relación causal entre la selección de las direcciones de medición por parte de los investigadores y el estado inicial de las partículas, de forma que la selección de variables (posterior en el marco de referencia en el que el laboratorio está en reposo) viene a determinar parcialmente el estado anterior (en ese marco) de las partículas. En otras palabras, *autonomía oculta* es falsa en estos modelos:

$$prob(\Psi/a \& b) \neq prob(\Psi).$$

5.2.6. La condición “localidad oculta” puede ser falsa

Aún existe una alternativa más. La condición de *localidad oculta* puede también ser falsa en un modelo legítimo de causa común de las correlaciones EPR. Es posible suponer que los sucesos de selección de las direcciones de medición sean causa parcial de los sucesos-resultado en el ala opuesta del experimento. No se cumpliría en tal caso la condición de Van Fraassen:

$$\begin{aligned} \text{prob}(s_1/a \ \& \ b \ \& \ \Psi) &\neq \text{prob}(s_1/a \ \& \ \Psi), \\ \text{prob}(s_2/a \ \& \ b \ \& \ \Psi) &\neq \text{prob}(s_2/b \ \& \ \Psi). \end{aligned}$$

Ya vimos que Van Fraassen afirma que si esta condición fuese falsa “entonces, en mi opinión, los sucesos-resultado no han sido referidos a una causa común pasada que explique su correlación”.³⁵ Es cierto que, en un modelo que no satisfaga *localidad oculta* la correlación no puede explicarse *solamente* por medio de una causa común. Pero, por otro lado, no hay razón alguna para suponer que tal causa común no exista, y que actúe como una causa parcial de cada uno de los resultados, siendo los sucesos de selección una causa adicional. Es decir, el razonamiento de Van Fraassen no excluye la siguiente estructura causal, que en principio es perfectamente compatible con la teoría de explicación causal de Salmon:

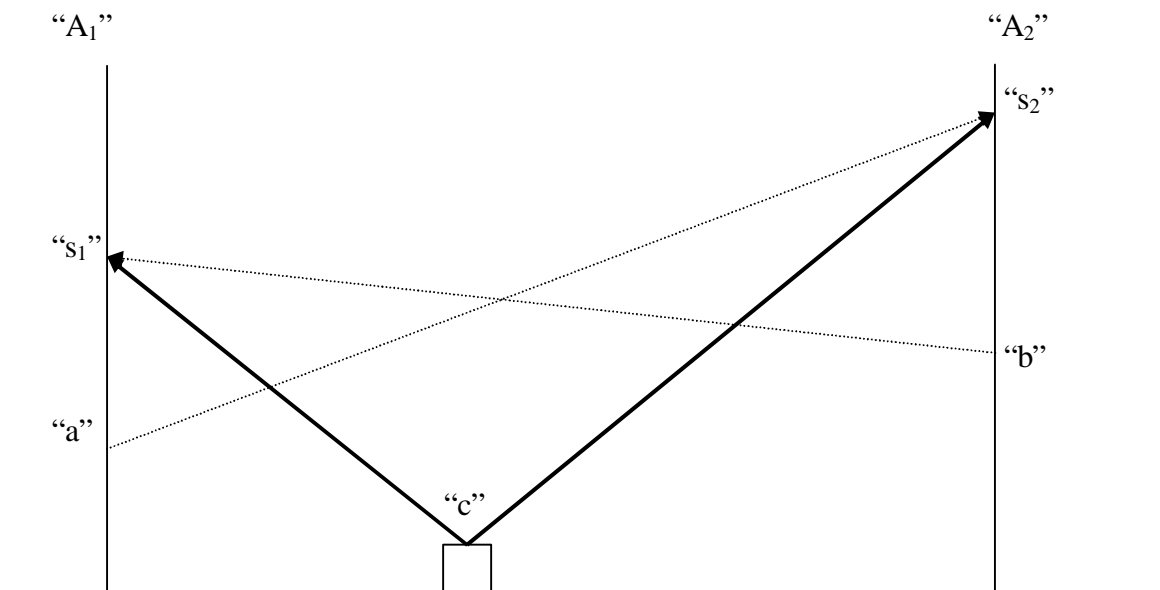


Figura 10.

6. Conclusiones

A pesar de los esfuerzos de Van Fraassen por excluir cualquier explicación causal de las correlaciones EPR, las alternativas – en forma de diversos modelos – que se nos presentan para poder llevar a cabo tal tipo de explicación son muchas y diversas. Algunos de estos modelos causales son más plausibles que otros, pero ninguno ha sido excluido aún por los resultados experimentales. Quizás en el futuro se diseñarán experimentos que puedan servir para confirmar o refutar empíricamente alguno de estos modelos en particular. En ese sentido, y para llevar a cabo tal labor el argumento de Van Fraassen puede constituir una espléndida guía. Pero me parece muy poco plausible que *todos* los modelos causales puedan llegar a ser refutados. Sería arrogante por mi parte pretender haber dado cuenta de todas las posibilidades, y no hay límite para la imaginación en este sentido. Por ejemplo, podríamos pasar a considerar todo tipo de propuestas híbridas: conexiones de causa directa entre las alas

³⁵ Van Fraassen (1982, en su versión de 1989, p. 105).

del experimento superpuestas sobre modelos de causa común, etc. Todos estos modelos parecen ser compatibles con la teoría de la explicación causal de Wesley Salmon, puesto que explican las correlaciones sobre la base de una combinación de procesos causales, interacciones de diversas formas, y forks de distinto tipo. El pesimismo al que el argumento de Van Fraassen parece haber arrastrado a Salmon con respecto a la capacidad de su teoría de la explicación causal de dar cuenta de las correlaciones cuánticas parece, al menos de momento, infundado.

Es posible que la tesis del realismo causal se demuestre algún día inviable. Existen algunos argumentos filosóficos interesantes y persuasivos que indican que no es una tesis necesaria.³⁶ Pero “dispensable” y “falsa” son dos propiedades harto diferentes. La imposibilidad de refutar una tesis metafísica es precisamente una parte importante de lo que confiere a tal tesis su carácter “metafísico”; por eso parece poco razonable suponer que razones de tipo experimental pudieran forzarnos eventualmente a abandonar el realismo causal.³⁷

REFERENCIAS:

Bohm, D. (1951), *Quantum Theory*, Prentice Hall.

Bohm, D. (1952), “A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of Hidden Variables, I and II”, *Physical Review*, **85**, pp. 166-193. Reprinted in Wheeler and Zurek (1985), pp. 369-396.

Butterfield, J. (1989), “A Space-Time Approach to the Bell Inequality”, in Cushing and McMullin, eds., (1989), pp. 114-144.

Cartwright, N. (1988), “How to Tell a Common Cause: Generalizations of the Conjunctive Fork Criterion”, in Fetzer, J. ed. (1988), pp. 181-188.

Cartwright, N. (1989), *Nature's Capacities and their Measurement*, Oxford University Press.

Chang, H. and N. Cartwright (1993), “Causality and Realism in the EPR Experiment”, *Erkenntnis*, **38**, pp. 169-189.

Costa de Beauregard, O., (1977), “Time Symmetry and the Einstein Paradox”, *Il Nuovo Cimento*, **42B**, pp. 41-64.

³⁶ Fine (1989) es una excelente defensa de la dispensabilidad de las explicaciones causales de EPR. Pero Fine, al contrario de lo que hace Van Fraassen, no intenta *refutar* empíricamente tales modelos.

³⁷ Es sorprendente, en mi opinión, que Van Fraassen, cuyo empirismo constructivo es abiertamente escéptico con respecto a las posibilidades de cualquier metafísica, haya invertido tal esfuerzo en la refutación empírica de una opción metafísica. La posición natural de un empirista constructivo parecería más bien ser la que adopto en este artículo: agnosticismo explícito (el equivalente al agnosticismo religioso) con respecto a la estructura última de la realidad; y escepticismo abierto acerca de nuestras posibilidades de confirmar o refutar empíricamente una tesis metafísica como el realismo causal.

- Cushing, J., (1995), *Quantum Mechanics: Historical Contingency and the Copenhagen Hegemony*, University of Chicago Press.
- Cushing and McMullin (eds.), (1989), *Philosophical Consequences of Quantum Theory*, Notre Dame Press.
- Dickson, M. and R. Clifton (1998), “Lorentz-Invariance in Modal Interpretations”, in Dieks, D. and P. Vermaas (1998).
- Dieks, D. and P. Vermaas (1998), *The Modal Interpretation of Quantum Mechanics*, Kluwer Academic Publishers.
- Dowe, P. (2000), *Physical Causation*, Cambridge University Press.
- Dummett, M. (1954), “Can an Effect Precede Its Cause?”, *Proceedings of the Aristotelian Society, Supp. Volume*, **38**, pp. 27-44.
- Einstein, A., B. Podolsky and N. Rosen (1935), “Can Quantum Mechanical Description of the World Be Considered Complete?”, *Physical Review*, **47**, pp. 777-780. Reimpreso en Wheeler and Zurek (1985), pp. 138-141.
- Fine, A. (1989), “Do Correlations Need to Be Explained”, in Cushing and McMullin (eds.), pp. 175-194.
- Fetzer, J. (ed.), (1988), *Probability and Causality*, Reidel.
- Hausman, D. and J. Woodward (1999), “Independence, Invariance and the Causal Markov Condition”, *British Journal for the Philosophy of Science*, **50**, 9, pp. 521-583.
- Hofer-Szabo, G, M. Redei and L. Szabo (1999), “On Reichenbach’s Common Cause Principle and Reichenbach’s notion of Common Cause”, *British Journal for the Philosophy of Science*, **50**, 3, pp. 377-399.
- Horwich, P. (1987), *Asymmetries in Time*, MIT Press.
- Lewis, D. (1986), *On the Plurality of Worlds*, Cambridge University Press.
- Maudlin, T. (1995), *Quantum Non-Locality and Relativity*, Oxford Blackwells.
- Price, H. (1996), *Time’s Arrow and Archimedes’ Point*, Oxford University Press.
- Psillos, S. (2002), *Causation and Explanation*, Acumen.
- Reichenbach, H., (1956), *The Direction of Time*, University of California Press.
- Salmon, W. (1984), *Scientific Explanation and the Causal Structure of the World*, Princeton University Press.
- Salmon, W. (1994), “Causality without Counterfactuals”, *Philosophy of Science*, **61**, pp. 297-312.

Schrödinger, E., (1933), “The Present Situation in Quantum Mechanics: A Translation of Schrödinger’s ‘Cat Paradox’ Paper”, *Proceedings of the American Philosophical Society*, **124**, pp. 323-38, 1980. Reprinted in Wheeler and Zurek (1985).

Suárez, M. (1994), “La Cuestión de la Causalidad en el Experimento de Einstein, Podolsky y Rosen: Una Visión Crítica”, *Actas del II Congreso de la Sociedad de Lógica, Metodología y Filosofía de la Ciencia en España*, UNED.

Suárez, M. (1997), *Models of the World, Data-Models and the Practice of Science: The Semantics of Quantum Theory*, PhD dissertation, London School of Economics.

Suárez, M. (2000), “The Many Faces of Non-Locality: Dickson on the Quantum Correlations”, *British Journal for the Philosophy of Science*, **51**, 4, pp. 882-892.

Suárez, M. (2004a), “Quantum Selections, Propensities and the Problem of Measurement”, *British Journal for the Philosophy of Science*, **55**, 2, pp. 219-55.

Suárez (2004b), “Causal Processes and Propensities in Quantum Mechanics”, en Suárez y Bird (eds.), *Dispositions, Causes and Propensities in Science*, volumen monográfico de *Theoria*, 51, pp. 271-300.

Van Fraassen, B. (1982), “The Charybdis of Realism: Epistemological Implications of Bell’s Inequality”, *Synthese*, 53, pp. 25-38. Reimpreso con correcciones en Cushing and McMullin, eds. (1989).

Wheeler, J. and W. Zurek (1985), *Quantum Theory and Measurement*, Princeton University Press.