

LA NO-SEPARABILIDAD. ESTA LA REALIDAD FISICA EN EL ESPACIO-TIEMPO?

*Jairo Roldán Charria
Departamento de Física
Universidad del Valle*

Abstract

On this article a critical analysis is made of Einstein's realistic position, Bohr's epistemological answer to Einstein's objections to the completeness of Quantum Mechanics, non separability, its consequences and the possible ways of research of the problems that this last notion presents, to conclude that the most reasonable option for a believer in physical realism is to accept that the Independent Reality is not immerse in space-time.

Resumen

En este artículo se lleva a cabo un análisis crítico de la posición realista de Einstein, la respuesta epistemológica de Bohr a las objeciones de Einstein a la "completez" de la Mecánica Cuántica, la no-separabilidad, sus consecuencias y las posibles vías de investigación de los problemas que esta última noción presenta, para concluir que la opción más razonable para un partidario del realismo es aceptar que la Realidad en Sí no está inscrita en el espacio-tiempo.

1. EL REALISMO LOCAL DE EINSTEIN Y LA EPISTEMOLOGIA DE BOHR

Para comenzar un estudio de la no-separabilidad y analizar las consecuencias de este hecho, es conveniente recordar el debate entre Einstein y Bohr acerca de la interpretación de la Mecánica Cuántica. Einstein, en un famoso

artículo (1), expone, en el contexto de una ontología local, una demoledora argumentación en contra de la "completez" de la Cuántica, argumentación rebatida por Bohr (2) dentro del marco de una epistemología centrada en su idea de Complementaridad.

Einstein sostiene la existencia de una Realidad Objetiva Independiente de cualquier teoría y dice que debe distinguirse esa Realidad de los conceptos con que operan las teorías. Dentro del realismo de Einstein los conceptos de las teorías se construyen con el fin de que correspondan con la Realidad Objetiva y por medio de ellos podamos representarnos esa Realidad. La Realidad Objetiva debe, en la ontología einsteiniana, inscribirse en el espacio tiempo, en el sentido de que la situación real en una región espacio-temporal no debe depender en nada de la situación real en otra región espacio-temporal separada de ella por un intervalo de género espacial.

Para Einstein una teoría exitosa debe ser correcta, lo cual se juzga por el grado de acuerdo entre sus conclusiones y la experiencia humana, y completa, cuando cada elemento de la Realidad tiene su contraparte en la teoría. Es el carácter de "completez" de la Cuántica lo que se propone analizar Einstein. Para ello él precisa de un criterio que le permita identificar los elementos de la Realidad física. Einstein propone el siguiente criterio como suficiente: "Si, sin perturbar en modo alguno un sistema, podemos predecir con certeza, o sea con probabilidad igual a uno, el valor de una cantidad física, entonces existe un elemento de realidad física correspondiente a esa cantidad física".

Acerca del **criterio de realidad** de Einstein podemos anotar lo siguiente:

- a) **No es un criterio necesario.** La existencia de elementos de la Realidad Objetiva intrínsecamente al azar, que no pueden, entonces, predecirse con certeza en ninguna circunstancia, es una posibilidad lógica. Igualmente se tiene la posibilidad lógica de elementos de Realidad que no pueden predecirse con certeza a menos de perturbar el sistema en cuestión.
- b) **Es un criterio suficiente y razonable.** Consideremos, por ejemplo, el siguiente caso: Imaginemos un cuarto totalmente aislado de toda perturbación exterior, excepto la producida por un interruptor que se puede conectar desde afuera y que abre una ventanilla en una pared del cuarto y enciende una luz allí dentro. En el cuarto se tiene una ruleta con su correspondiente bolita. Supongamos que en un

instante t cualquiera un observador conecta el interruptor y observa la posición de la bolita en la ruleta y la ve en el número 5. El observador apaga luego la luz y se aleja del cuarto. Aceptamos como razonable que en un instante posterior cualquiera y a una distancia cualquiera del cuarto, el observador puede predecir con certeza que la posición de la bola en la ruleta será el número 5. Y esa predicción la hará, en el momento y en el lugar que la hace, sin perturbar en modo alguno la bolita. ¿Por qué aceptamos como razonable lo anterior? Simplemente porque consideramos que la posición de la bolita es una propiedad en sí de ella que no depende de su observación. En suma: que esa posición es un elemento de la Realidad Objetiva. Ejemplos como este son fáciles de imaginar e ilustran lo razonable del criterio de Einstein.

Con base en su criterio de realidad, Einstein confronta la Cuántica con la concepción de una Realidad inscrita en el espacio-tiempo y concluye que la Mecánica Cuántica es una teoría incompleta. Podemos formular su argumento en la forma siguiente:

Sea un sistema de dos partículas que interactúan entre $t = 0$ y $t = T$ tiempo después del cual ya no interactúan más. Si se conoce la función de onda a $t = 0$ es posible, mediante la ecuación de Schrödinger, conocer la función de onda en un tiempo posterior cualquiera. Supongamos que la función de onda a un tiempo $t > T$ es:

$$\psi = h\delta(x_1 - x_2 + x_0) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{\frac{2\pi i}{h}(x_1 - x_2 + x_0)p} dp$$

$$x_0 = \text{constante}$$

Podemos expandir ψ en términos de las funciones: $u_p(x_1) = e^{\frac{2\pi i}{h} p x_1}$ que son funciones propias del operador $\hat{p}_1$: $\hat{p}_1 u_p(x_1) = p u_p(x_1)$. Entonces:

$$\psi = \int u_p(x_1) \psi_p(x_2) dp$$

donde:

$$\psi_p(x_2) = e^{-\frac{2\pi i}{h}(x_2 - x_0)p}$$

$\psi_p(x_2)$ es función propia del operador $\hat{p}_2$: $\hat{p}_2 \psi_p(x_2) = -p \psi_p(x_2)$.

Si se mide p_1 y se halla el valor p se puede entonces predecir con certeza que el valor de una medición de p_2 dará $-p$. Según el criterio de realidad de Einstein debe existir un elemento de realidad asociado con p_2 .

por Einstein. La medida posterior de la posición o del momento de una de las dos partículas permitirá conocer la posición o el momento de la otra partícula. Ese hecho significa para Bohr que se tienen dos procedimientos experimentales diferentes que permiten el uso no ambiguo de dos conceptos clásicos complementarios. En efecto, dice Bohr, si medimos la posición de la partícula 1, nos será posible conocer la posición de la partícula 2. Sin embargo, habrá un intercambio incontrolable de momento entre la partícula y el instrumento de medida y, por tanto, una medida posterior del momento de la partícula 1 no nos permitirá conocer el momento de la partícula 2. Si medimos, en cambio, el momento de la partícula 1, podremos conocer el momento de la partícula 2. No obstante, por la interacción entre la partícula y el instrumento de medida, habrá un desplazamiento incontrolable de la partícula y por ello una medida posterior de su posición no nos permitirá conocer la posición de la partícula 2.

En conclusión, dice Bohr, cuando hacemos una medida de la posición o del momento de la primera partícula, y por consiguiente de la posición o del momento de la segunda partícula respectivamente, se tiene, aún si no existe ninguna interacción directa con la partícula 2, una influencia sobre las condiciones que definen los tipos posibles de predicciones relativas al comportamiento futuro de esa partícula. Decir, entonces, que las mediciones sobre la partícula 1 se hacen "sin perturbar en modo alguno la partícula 2" es, según Bohr, una manera ambigua de hablar. Para Bohr, las condiciones que definen los tipos posibles de predicciones que pueden hacerse acerca del comportamiento futuro de un sistema, son un elemento inherente de todo fenómeno al cual pueda asignarse a justo título el término de Realidad física.

Vemos entonces que Bohr no se pregunta por la Realidad en Sí de los sistemas sino por las condiciones en que puede usarse sin ambigüedad el término Realidad física. Su enfoque hacia la interpretación de la cuántica no es ontológico sino puramente epistemológico.

Durante cerca de tres décadas el debate entre Einstein y Bohr se consideró puramente filosófico. Los avances teórico-experimentales iniciados por las desigualdades de Bell lo sacaron, sin embargo, de ese contexto puramente filosófico. Bell mostró, en efecto, que la concepción einsteiniana de la Realidad física da lugar a ciertas desigualdades entre cantidades físicas medibles y que la mecánica cuántica predice una violación de tales desigualdades. Se presenta, entonces, una posibilidad de decidir experimentalmente entre las posiciones de Bohr y Einstein. El veredicto experimental no favorece a Einstein y prueba que la llamada no-separabilidad es una propiedad de la Realidad física. El resto del artículo se dedicará a un

análisis de la no-separabilidad y las consecuencias que de ella se deducen.

2. EL REALISMO Y EL REALISMO FISICO

La no-separabilidad es una noción que sólo tiene sentido dentro del Realismo, posición filosófica según la cual "más allá", "detrás", o "subyaciendo" los fenómenos, existe una Realidad en Sí independiente de nuestro conocimiento y de lo que medimos o decidimos medir, pero que influye, sin embargo, sobre los resultados de nuestras medidas. Por su propia concepción general, la Realidad en Sí o Independiente, vale decir independiente de lo humano, de la existencia de los humanos, es una noción que no es definible operacionalmente. Como el nombre lo indica, los conceptos operacionales se definen mediante un procedimiento operativo experimental, con determinados aparatos y métodos concebidos y contruidos por el hombre. Lo definible operacionalmente lo es a través o por medio de fenómenos o, dicho de otro modo, son los fenómenos los que permiten definir operacionalmente los conceptos. La Realidad en Sí al concebirse como más allá de lo fenomenal, no es, por tanto, un concepto operacionalmente definible. Tampoco es un término teórico como la función de onda ψ puesto que no es necesario para ningún cálculo ni liga entre sí conceptos definidos operacionalmente. Hemos dicho que se concibe la Realidad en Sí como "algo" que trasciende los fenómenos y que existe independiente de la existencia de lo humano pero que influye en los resultados de nuestras medidas. Se puede entonces afirmar que el concepto de Realidad Independiente no es un concepto científico sino un concepto filosófico o metafísico. ¿Significa ello que automáticamente deba ser considerado como un sin-sentido? ¿O que la Ciencia deba considerar la idea de Realidad en Sí como inútil? El hecho de que la Realidad Independiente sea un concepto filosófico o metafísico no lo relega automáticamente a la categoría de sin-sentido a menos que la Ciencia se reduzca a lo meramente operativo. Dado que un análisis con alguna profundidad del Realismo y las razones que se presentan para justificar esa posición filosófica excedería los límites de este artículo, nos limitaremos a enumerar brevemente algunos de los puntos que permiten aceptar como razonable la opción realista. Entre ellos se tiene:

- a) La Ciencia no se reduce únicamente a lo operativo, a lo pragmático. Existe otra dimensión de la Ciencia, que podemos llamar "fundamentalista" (3), la cual permite analizar conceptos y las condiciones de su utilización sin ambigüedad. Si la Ciencia pretende aportar algún entendimiento del mundo y presentar elementos válidos y relevantes

para una comprensión del universo, si se concibe como algo más que una serie de "recetas que funcionan" (4), es necesario ir más allá de lo puramente operativo.

- b) No es claro cómo se puede dar algún tipo de explicación coherente tanto a la observada regularidad de los fenómenos como al acuerdo entre los conceptos creados por la mente y los fenómenos externos a ella, si se rechaza la idea de Realidad en Sí y se la considera como carente de sentido (5).
- c) Tampoco es claro cómo entender el "acuerdo intersubjetivo" acerca de los fenómenos, el cual permite crear y hacer avanzar la Ciencia y que no proviene de una mera convención arbitraria entre los hombres sino que es más bien impuesto por los fenómenos exteriores, si no se acepta como última explicación de él la existencia de una Realidad Independiente.
- d) Si se considera sin sentido la noción de Realidad en Sí y se lleva a sus extremos lógicos una estricta posición positivista de principio, es difícil escapar al solipsismo, posición filosófica según la cual yo mismo sería la fuente del mundo fenomenal, incluido el conjunto de los demás observadores (6).

Los puntos anteriores llevan al autor de este artículo a aceptar con d'Espagnat (7) que la idea de Realidad en Sí es necesaria para la coherencia interna del pensamiento. Partiremos, entonces, de la aceptación de la noción de Realidad en Sí como válida y analizaremos qué conclusiones, con respecto a esa Realidad, surgen de los relativamente recientes experimentos que tienen que ver con el Teorema de Bell.

Es importante recalcar que es posible adoptar una posición puramente positivista en grado sumo, según la cual se rechazan como carentes de sentido tanto la idea de Realidad Independiente como las preguntas asociadas con el acuerdo entre la mente y los fenómenos, el acuerdo intersubjetivo y en general todas las que se hagan con respecto a un entendimiento del mundo que vaya más allá de las meras conexiones entre fenómenos. A juicio del autor, si bien es válida tal posición, es demasiado pobre para satisfacer realmente la mente humana. Obviamente, si se acepta la posición puramente positivista y se rechaza como sin sentido la noción de Realidad en Sí la mayor parte de este artículo deja de tener sentido también.

Dejando de lado un poco los intrínsecos filosóficos, se debe decir que el concepto de Realidad en Sí es la idea "natural" que, con respecto a la

naturaleza, se forma en la mente de todo estudiante de Ciencia y en general de todo científico "filosóficamente desprevenido". Incluso todo el poderoso andamiaje de la Mecánica Clásica es compatible con la noción de Realidad en Sí y con la idea de propiedades en sí de los cuerpos. El concepto de Real Independiente es igualmente un concepto "natural" en la concepción ordinaria de los fenómenos: la posición de un carro en el parqueadero se considera como una propiedad del carro independiente de si se le observa o no. En la concepción ordinaria del mundo, se acepta que la afirmación de que un árbol en un bosque jamás visto por hombre alguno tiene una posición, es una afirmación plena de sentido. Desde ese punto de vista "ordinario" lo difícil quizá sea aceptar una posición no realista.

No obstante, todos los problemas que a la concepción ordinaria del mundo presenta la Mecánica Cuántica y el rechazo continuo de muchas de las propiedades que se atribuían a la Realidad en Sí al que nos ha obligado la Ciencia moderna, así como también el éxito que como metodología tiene el positivismo, hacen atractiva la opción no realista. De todos modos, los argumentos esbozados en los puntos a), b), c) y d) presentados anteriormente, llevan al autor, como ya se dijo, a considerar el concepto de Real en Sí como necesario para la coherencia del pensamiento.

El Realismo, sin embargo, es una posición muy general. Aquí nos interesa un tipo específico de Realismo: el llamado "Realismo Físico", en el cual se concibe la Realidad como compuesta de partes llamadas sistemas físicos que pueden interactuar siendo, sin embargo, distintos. Se postula además que el *estado objetivo* de esos sistemas físicos está especificado por un conjunto de parámetros representados por números reales. Por estado objetivo se quiere decir el estado en sí de cada uno de esos sistemas físicos. Por ejemplo: el estado de una partícula en Mecánica Clásica viene dado por 6 números, 3 para la posición y 3 para el momento. Se supone, en el Realismo Físico, que esos números existen independientes de su observación, o sea que la partícula posee en sí una posición y un momento independientemente de si se observan o no tales variables.

3. LA SEPARABILIDAD

La concepción de la Realidad como compuesta de partes que son distintas pero que pueden interactuar, lleva implícita una idea general de separación. Esa idea está implícita también en la noción familiar de objeto: un objeto es algo que está delimitado, cerca o lejos, en suma "separado", de otros objetos y de nosotros mismos. En la noción más refinada de sistema físico, este último se concibe como algo suficientemente aislado de sus alrededores y se

considera que lo que sucede en un sistema físico no depende, o sólo depende muy débilmente, de lo que sucede en otros sistemas físicos suficientemente alejados espacial y/o temporalmente del sistema en cuestión. Dicho de otro modo, las entidades que componen la Realidad se considera que son localizables en regiones distintas y que no ejercen entre sí sino influencias que decrecen con la distancia. Esta idea general de separabilidad se denomina "separabilidad en sentido amplio" (8). La idea, sin embargo debe ser precisada. Así lo indica la presencia de la palabra "suficientemente" que, de un modo no muy preciso, se empleó varias veces en la presentación de la idea de separabilidad en sentido amplio.

Para precisar la idea de separabilidad consideremos la siguiente situación:

Se tiene una sonda espacial Sl en la Luna y otra sonda Sm en Marte. Las dos sondas presentan un comportamiento muy sencillo: pueden moverse o hacia la derecha o hacia la izquierda. Ese comportamiento está controlado por un dispositivo D en la Tierra mediante el envío de pares de señales. Supongamos que D envía la primera señal de cada par siempre a la misma sonda, que si una sonda se mueve a la izquierda la otra lo hace a la derecha y viceversa, que el intervalo entre las señales de cada par es siempre el mismo, que el intervalo entre pares de señales es al azar y que el movimiento de la primera sonda en cada envío de señales es también al azar.

Dadas las condiciones anteriores, un observador de las sondas encontrará correlaciones entre ellas. Así, por ejemplo, un observador en la Luna puede encontrar la probabilidad de que Sl se mueva a la derecha o a la izquierda. Ahora, si conoce además el comportamiento de Sm , encontrará que cada vez que Sl va a la derecha, Sm va a la izquierda y viceversa. Mediante esta correlación él puede predecir con certeza el comportamiento de una sonda a partir del conocimiento del comportamiento de la otra.

¿A que atribuirá el observador esa correlación? Veamos sus posibilidades:

- i) Un sonda controla la otra. O sea, envía una señal a la otra y le indica así su comportamiento. El observador aceptará esa explicación siempre y cuando el intervalo entre los dos eventos El : movimiento de Sl a la izquierda o a la derecha y Em : movimiento de Sm a la derecha o a la izquierda, sea del género temporal. Pero si el intervalo es del género espacial no aceptará la explicación pues la prohíbe la relatividad. (Obviamente suponemos que nuestro observador conoce la relatividad).

- ii) El comportamiento de las sondas es controlado por otro evento Eo en

otro sistema, evento anterior tanto a E_l como a E_m . Si el intervalo entre E_l y E_m es del género espacial, la única explicación aceptable para el observador será la que acabamos de describir. En nuestro ejemplo particular E_o es la emisión de la señal desde D .

La discusión anterior nos indica que tenemos que tener en cuenta los dos siguientes puntos para precisar la idea de separabilidad:

- a) Toda influencia física posible entre dos sistemas separados entre sí se hará más y más pequeña a medida que crece la distancia entre los sistemas.
- b) Si se tienen dos eventos, E_1 en un sistema S_1 y E_2 en un sistema S_2 , tales que su intervalo espacio-temporal es de género espacial, toda correlación eventual entre ellos debe ser considerada como producida por un evento E_o anterior a ellos que tiene lugar en otro sistema S_o .

Vale la pena anotar lo siguiente con respecto al ejemplo de las dos sondas espaciales:

- El observador en la Luna asignará un cierto valor entre 0 y 1 para la probabilidad del próximo movimiento de S_l hacia la derecha o hacia la izquierda. Ahora, si él conoce la correlación entre S_l y S_m y que, por ejemplo, S_m se mueve antes que S_l , el conocimiento del movimiento de S_m le permitirá predecir con certeza el próximo movimiento de S_l .
- Si el observador sabe, además, acerca del dispositivo en la Tierra y conoce los detalles de él, calculará las probabilidades de los movimientos de S_l con base en esa sola información. La información adicional sobre el movimiento de la otra sonda le será irrelevante. La razón por la cual consideramos que el observador asigna una probabilidad diferente para los movimientos de S_l según conozca o no el movimiento de S_m , es que suponemos que no conoce ni la existencia ni los detalles de D .

4. EL PRINCIPIO DE SEPARABILIDAD

La idea general de separación física se precisa por medio de un principio de separabilidad. Lo enunciaremos en el marco del ejemplo presentado en la sección anterior.

Se tiene el dispositivo D que emite simultáneamente dos señales que van a cada sonda. Estas últimas ya no están en la Luna y en Marte sino en

puntos arbitrarios del espacio: la sonda S_1 en el punto 1 y la sonda S_2 en el punto 2. λ es un conjunto de parámetros que especifican el estado objetivo de D en el momento de la emisión de las dos señales. F es un aparato cerca a S_1 el cual tiene una dirección variable $\vec{a}$ y funciona de tal modo que si S_1 se mueve hacia la derecha de $\vec{a}$, F indica el valor α_1 y si S_1 se mueve hacia la izquierda de $\vec{a}$, F indica el valor α_2 . F registra, entonces, el movimiento de S_1 con respecto a la dirección variable $\vec{a}$. Indicamos con R la región espacio-temporal donde F lleva a cabo su medición del movimiento de S_1 . De manera similar, el aparato G tiene una dirección variable $\vec{b}$ y registra el movimiento de S_2 con respecto a $\vec{b}$ en la región espacio-temporal R' . Si S_2 se mueve hacia la derecha de $\vec{b}$, G indica el valor β_1 y si S_2 se mueve hacia la izquierda de $\vec{b}$, G indica el valor β_2 .

Consideremos ahora la probabilidad p de que F indique el resultado α_i ($i = 1, 2$) cuando $\vec{a}$ y el estado objetivo λ del dispositivo D están fijados completamente. Hablaremos de probabilidades puesto que, independientemente de postular o no el determinismo estricto, los resultados de las medidas no pueden, en general, predecirse con certeza a causa de la insuficiencia del conocimiento de los estados objetivos preexistentes de los diversos sistemas en juego. Definimos las probabilidades como frecuencias de ocurrencia sobre "ensembles" estadísticos cuyo número es muy grande.

En esencia, una formulación cualitativa del principio de separabilidad está contenida en las dos afirmaciones que siguen:

- a) El valor de p no depende o no depende sino muy débilmente, del valor de la dirección $\vec{b}$ escogida por el experimentador que manipula el instrumento G y del resultado de la medida dado entonces por G . Si se tiene en cuenta la discusión de la sección anterior, es fácil ver que la condición a) es una condición natural.
- b) La distribución de probabilidades relativa al estado objetivo del dispositivo es independiente del valor de las direcciones $\vec{a}$ y $\vec{b}$. La afirmación b) significa simplemente que los detalles de la manipulación de D no dependen en nada de las orientaciones $\vec{a}$ y $\vec{b}$. Vemos sin dificultad que la condición b) es también natural.

Una concepción realista en la cual se considera como válido el principio de separabilidad puede llamarse **concepción separable** (3). La física clásica es compatible con la concepción separable puesto que en ella los estados de los sistemas físicos se consideran como existentes en sí independientemente de si son o no observados, los sistemas físicos se asignan a una cierta región limitada del espacio-tiempo, las interacciones físicas dismi-

nuyen con la distancia y ninguna influencia física puede transmitirse más rápidamente que la luz.

Es interesante señalar que el principio de separabilidad corresponde a la idea de separación del lenguaje común y que puede considerarse, entonces, que constituye un refinamiento de esta idea.

Formulación cuantitativa del principio de separabilidad

Para confrontar con experimentos la validez del principio de separabilidad es necesario formularlo de modo cuantitativo. Ello se logra mediante desigualdades entre las probabilidades: $p(\alpha_i; \lambda, \vec{a})$; $p(\alpha_i; \lambda, \vec{a}, \vec{b})$ y $p(\alpha_i; \lambda, \vec{a}, \vec{b}, \beta_j)$ ($i, j = 1, 2$) donde $p(\alpha_i; \lambda, \vec{a})$ es la probabilidad de que el resultado obtenido con el instrumento F sea α_i cuando el valor de la dirección $\vec{a}$ y el estado objetivo del dispositivo D están fijados completamente y las probabilidades $p(\alpha_i; \lambda, \vec{a}, \vec{b})$ y $p(\alpha_i; \lambda, \vec{a}, \vec{b}, \beta_j)$ se definen similarmente.

El principio se formula cuantitativamente mediante dos afirmaciones:

- a) Las distancias entre D , F y G pueden siempre escojerse lo suficientemente grandes para que:

$$\begin{aligned} |p(\alpha_i; \lambda, \vec{a}, \vec{b}, \beta_j)p(\alpha_i; \lambda, \vec{a}, \vec{b}) - 1| &< 10^{-3} \\ |p(\alpha_i; \lambda, \vec{a}, \vec{b})p(\alpha_i; \lambda, \vec{a}) - 1| &< 10^{-3} \end{aligned} \quad (4.1)$$

El valor de 10^{-3} en cierto modo es arbitrario, podemos igualmente escoger cualquier otro valor suficientemente pequeño en relación con (4.1).

Nótese que la ecuación (4.1) lo que dice es que la diferencia entre $p(\alpha_i; \lambda, \vec{a}, \vec{b}, \beta_j)$ y $p(\alpha_i; \lambda, \vec{a}, \vec{b})$ se puede hacer muy pequeña escogiendo adecuadamente las distancias entre D , F y G y similarmente con la diferencia entre $p(\alpha_i; \lambda, \vec{a}, \vec{b})$ y $p(\alpha_i; \lambda, \vec{a})$. En efecto: La primera desigualdad (1) se puede expresar como:

$$|p(\alpha_i; \lambda, \vec{a}, \vec{b}, \beta_j) - p(\alpha_i; \lambda, \vec{a}, \vec{b})| < 10^{-3} p(\alpha_i; \lambda, \vec{a}, \vec{b})$$

o sea:

$$\begin{aligned} p(\alpha_i; \lambda, \vec{a}, \vec{b}, \beta_j) - p(\alpha_i; \lambda, \vec{a}, \vec{b}) &< 10^{-3} p(\alpha_i; \lambda, \vec{a}, \vec{b}) \\ & \text{y} \\ p(\alpha_i; \lambda, \vec{a}, \vec{b}) - p(\alpha_i; \lambda, \vec{a}, \vec{b}, \beta_j) &< 10^{-3} p(\alpha_i; \lambda, \vec{a}, \vec{b}) \end{aligned}$$

Y similarmente se analiza la segunda desigualdad (4.1).

Nótese también que si las medidas sobre S_2 no tienen ningún efecto en las medidas sobre S_1 , como es el caso cuando el intervalo espacio temporal entre R y R' es del género espacial, se tendrá que: $p(\alpha_i; \lambda, \vec{a}) = p(\alpha_i; \lambda, \vec{a}, \vec{b}) = p(\alpha_i; \lambda, \vec{a}, \vec{b}, \beta_j)$ y las relaciones (4.1) se reducen a:

$$\begin{aligned} p(\alpha_i; \lambda, \vec{a}, \vec{b}, \beta_j) p(\alpha_i; \lambda, \vec{a}, \vec{b}) - 1 &= 0 \\ p(\alpha_i; \lambda, \vec{a}, \vec{b}) p(\alpha_i; \lambda, \vec{a}) - 1 &= 0 \end{aligned} \quad (4.2)$$

- b) La distribución estadística $p(\lambda)$ de parámetros λ que especifican el estado objetivo de D en el momento de la emisión de las señales es independiente de $\vec{a}$ y $\vec{b}$.

5. LA NO-SEPARABILIDAD

El principio de separabilidad implica la existencia, entre cantidades medibles, de ciertas desigualdades llamadas de Clauser, Horne, Shimony y Holt (CHSH) las cuales constituyen una generalización de las denominadas desigualdades de Bell (10).

En efecto: consideremos que U y V son dos partículas de spin $1/2$ creadas en el estado singlete. Sean α y β componentes del spin de U y V a lo largo de las direcciones $\vec{a}$ y $\vec{b}$ respectivamente, de donde α y β son $\pm \frac{1}{2}\hbar$. (Se escogen unidades adecuadas para que α y β sean ± 1).

Llamemos $p(\alpha_i, \beta_j; \lambda, \vec{a}, \vec{b})$ la probabilidad de obtener los valores α_i y β_j para la medida del spin de U y V en las direcciones $\vec{a}$ y $\vec{b}$ respectivamente cuando el estado objetivo λ de la fuente está completamente fijado.

Sea $M(\lambda, \vec{a}, \vec{b})$ el valor medio del producto $\alpha\beta$ del resultado de la medida del spin α de la partícula U en la dirección $\vec{a}$ y del spin β de la partícula V en la dirección $\vec{b}$ para un "ensemble" de sistemas $U + V$ correspondientes todos al mismo estado objetivo λ .

Ahora bien, si las reglas de la Mecánica Cuántica son correctas, $M(\lambda, \vec{a}, \vec{b})$ no es una cantidad medible pues λ es un conjunto de "parámetros ocultos" y un "ensemble" de sistemas todos con los mismos valores de sus parámetros ocultos ("ensemble no-cuántico") no se puede preparar en la práctica (si la cuántica es correcta).

Vale la pena detenerse un poco en este muy importante punto. En la interpretación usual de la cuántica se supone que ésta es una teoría completa y que por tanto el indeterminismo cuántico es irreducible. Una interpretación alterna supone la existencia de variables ocultas. En tal interpretación se asume que la cuántica no es completa y que existen detalles "finos" de la realidad que no son descritos por la función de onda sino por variables que los experimentos actuales no permiten conocer y que

por lo tanto están ocultas. Según esa interpretación, es posible considerar "ensembles" de sistemas todos con las mismas variables ocultas. Tales "ensembles no-cuánticos" no están descritos ni por una función de onda ni por una matriz densidad. En la interpretación de variables ocultas un "ensemble cuántico", o sea aquel descrito por una función de onda o por una matriz densidad, sería la unión de varios "ensembles no-cuánticos". Consideremos, por ejemplo, un haz de átomos de plata neutros en el estado fundamental que pasa por una región donde existe un campo magnético no uniforme en una dada dirección. Sabemos que el haz se abrirá en dos según la proyección que adquiera el spin a lo largo de la dirección del campo magnético. El ensemble E de los átomos en el haz inicial estará descrito por una cierta función de onda. Si existen variables ocultas, ellas determinarán cuáles sistemas del ensemble E corresponden a átomos que irán en una de las direcciones y cuáles a átomos que irán en la otra dirección. Si simbolizamos por E_+ el ensemble correspondiente a sistemas todos con valores de las variables ocultas tales que los átomos del ensemble irán en una de las direcciones y por E_- el ensemble correspondiente a sistemas con valores de las variables ocultas tales que los átomos del ensemble irán en la otra dirección, tendremos que:

$$E = E_+ \cup E_-$$

Los ensembles E_+ y E_- no tienen dispersión, o sea que λ está fijo, de donde $\Delta\lambda = 0$. No están descritos ni por una función de onda ni por una matriz densidad.

La hipótesis de la completez de la cuántica asume que no existen variables ocultas o sea que no existen ensembles no-cuánticos.

Si las reglas de la cuántica son universalmente correctas, no es posible construir en la práctica ensembles no-cuánticos pues todo ensemble que se tenga estará descrito por una función de onda o por una matriz densidad.

Volvamos ahora al caso que nos ocupa. Para obtener, entonces, una cantidad medible es necesario promediar sobre los λ y obtener: $M(\vec{a}, \vec{b}) =$ valor promedio del producto $\alpha\beta = \int M(\lambda, \vec{a}, \vec{b})\rho(\lambda)d\lambda$. Si se consideran dos posibles direcciones $\vec{a}$ y $\vec{a}'$ en las cuales medir α y dos posibles direcciones $\vec{b}$ y $\vec{b}'$ en las cuales medir β , se pueden calcular $M(\vec{a}, \vec{b})$, $M(\vec{a}, \vec{b}')$, $M(\vec{a}', \vec{b})$ y $M(\vec{a}', \vec{b}')$ teniendo en cuenta (4.1) y se obtiene (8):

$$|M(\vec{a}, \vec{b}) + M(\vec{a}, \vec{b}')| + |M(\vec{a}', \vec{b}) - M(\vec{a}', \vec{b}')| < 2 + 1.6 \times 10^{-2} \quad (5.1)$$

En el caso de un intervalo de género espacial entre R y R' se obtiene:

$$|M(\vec{a}, \vec{b}) + M(\vec{a}, \vec{b}')| + |M(\vec{a}', \vec{b}) - M(\vec{a}', \vec{b}')| < 2 \quad (5.2)$$

(5.2) se conoce como las relaciones CHSH.

Ahora, sucede que las reglas de la cuántica preveen para $M(\vec{a}, \vec{b})$ el valor: $M(\vec{a}, \vec{b}) = -\cos \theta$ donde θ es el ángulo entre $\vec{a}$ y $\vec{b}$ (9). Para ciertos ángulos entre $\vec{a}$, $\vec{b}$, $\vec{a}'$, $\vec{b}'$ se obtiene que:

$$|M(\vec{a}, \vec{b}) + M(\vec{a}, \vec{b}')| + |M(\vec{a}', \vec{b}) - M(\vec{a}', \vec{b}')| = 2.8 \quad (5.3)$$

El hecho de que las reglas de la cuántica prevean en ciertos casos una violación de las desigualdades (5.1) da la posibilidad de someter a prueba el principio de separabilidad y con ello la concepción de una realidad física inscrita en el espacio-tiempo. Dados los resultados experimentales que muestran la violación de las desigualdades aún en el caso en que la separación es del género espacial (11), la comunidad internacional de los físicos es casi unánime en afirmar que la no-separabilidad, o sea la violación del principio de separabilidad, es algo probado experimentalmente (12).

6. ALGUNAS ANOTACIONES SOBRE LA NO-SEPARABILIDAD

El principio de separabilidad y la no-separabilidad sólo tienen sentido desde un punto de vista realista.

El principio de separabilidad sigue siendo válido en todos los fenómenos macroscópicos.

Se debe, entonces, tener cuidado con ciertas afirmaciones acerca de que las desigualdades de Bell llevan el dilema que presentan los fenómenos cuánticos directamente al plano de los fenómenos macroscópicos (13). Si bien es verdad que las distancias entre los sistemas sobre los cuales se miden las componentes de spin son de orden macroscópico, los sistemas en cuestión son microscópicos. El hecho de que las mediciones se determinen mediante ocurrencias de eventos macroscópicos (14) es apenas el requerimiento necesario para tener una medición. Respecto a este tópico de la validez de la separabilidad en los fenómenos macroscópicos, es importante anotar que se puede mostrar que en el caso más general de dos partículas de spin s arbitrario creadas en el estado "singlete", el principio de separabilidad también se viola (15). Sucede, sin embargo, que el dominio de ángulos para los cuales se viola el principio disminuye como $1/s$ (16). En el límite $s \rightarrow \infty$, cuando los sistemas se vuelven macroscópicos, el rango de violación se hace 0 y la separabilidad es válida.

La no-separabilidad no permite la transmisión de señales supraluminosas (que van a mayor velocidad que la de la luz).

En este punto es necesario anotar que la causalidad relativista puede interpretarse de dos maneras: una manera pragmática según la cual la palabra señal debe usarse para referirse a una entidad que sirva a los humanos para intercambiar información. Por tanto la causalidad relativista debe entenderse como que ninguna señal *utilizable* puede propagarse más rápido que la luz. La otra manera de interpretar la causalidad relativista, que fue la manera como la interpretaba Einstein, es que la palabra señal debe entenderse que se refiere a cualquier influencia física, sin restricción alguna acerca de la posibilidad o no de utilizarla. Dentro de esa interpretación la causalidad relativista significa que ninguna influencia física puede propagarse más rápido que la luz.

Si se interpreta la causalidad relativista pragmáticamente, puede mostrarse que la no-separabilidad no entra en conflicto con la relatividad, es decir que los fenómenos donde se viola la separabilidad no permiten la transmisión de señales (vale decir utilizables) supraluminosas. La siguiente es una prueba sencilla de ello:

Las relaciones (4.2) (intervalo de género espacial entre los dos sistemas) pueden escribirse así:

$$p(\alpha_i; \lambda, \vec{a}, \vec{b}, \beta_j) = p(\alpha_i; \lambda, \vec{a}, \vec{b})$$

O sea,

$$p(\alpha_i; \lambda, \vec{a}, \vec{b}, \beta_1) = p(\alpha_i; \lambda, \vec{a}, \vec{b}, \beta_2) \quad (6.1)$$

y

$$p(\alpha_i; \lambda, \vec{a}, \vec{b}) = p(\alpha_i; \lambda, \vec{a}) \quad (6.2)$$

Si se pudiésemos construir ensembles no-cuánticos en la práctica, la violación de (6.1) no permitiría transmitir señales supraluminosas, pues no se pueden escoger de antemano los resultados β_1 y β_2 . En cambio la violación de (6.2) permitiría transmitir señales que irían a mayor velocidad que la luz; en realidad serían señales transmitidas instantáneamente: se podría construir, por ejemplo, un código tipo Morse escogiendo como "punto" a $p(\alpha_i; \lambda, \vec{a})$: situación en que se hacen medidas con F sobre S_1 en dirección $\vec{a}$ pero no se hace ninguna medida sobre S_2 , y como "raya" a $p(\alpha_i; \lambda, \vec{a}, \vec{b})$: situación en que se hacen medidas en ambos sistemas.

Veamos que sucede en el caso cuántico en que se viola la separabilidad. El estado singlete es:

$$|\psi_0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[|\mu_+^{\vec{a}}(1)\rangle |\mu_-^{\vec{a}}(2)\rangle - |\mu_-^{\vec{a}}(1)\rangle |\mu_+^{\vec{a}}(2)\rangle \right]$$

donde $|\mu_{\pm}^{\vec{a}}(1)\rangle$ son las funciones propias de $\vec{S}_1 \cdot \vec{a}$ y de S_1^2 y similarmente $|\mu_{\pm}^{\vec{a}}(2)\rangle$ son las funciones propias de $\vec{S}_2 \cdot \vec{a}$ y de S_2^2 .

Si se calculan las probabilidades

$$p(\alpha_i, \beta_j; \vec{a}, \vec{b}) = |\langle \mu_{\alpha_i}^{\vec{a}}(1) | \langle \mu_{\beta_j}^{\vec{b}}(2) | \psi_0 \rangle|^2$$

se obtiene (17):

$$\begin{aligned} p(+, +; a, b) &= 1/2 \sin^2 \frac{\theta}{2} \\ p(-, +; a, b) &= 1/2 \cos^2 \frac{\theta}{2} \\ p(+, -; a, b) &= 1/2 \cos^2 \frac{\theta}{2} \\ p(-, -; a, b) &= 1/2 \sin^2 \frac{\theta}{2} \end{aligned} \quad (6.3)$$

donde θ es el ángulo entre $\vec{a}$ y $\vec{b}$.

Utilizando (6.3) y las relaciones de la teoría de las probabilidades:

$$p(\alpha_i; \vec{a}, \vec{b}, \beta_j) = \frac{p(\alpha_i, \beta_j; \vec{a}, \vec{b})}{p(\beta_j; \vec{a}, \vec{b})} \quad \text{y} \quad p(\beta_j; \vec{a}, \vec{b}) = \sum_{\alpha_i} p(\alpha_i, \beta_j; \vec{a}, \vec{b})$$

se muestra fácilmente que:

$$p(\alpha_i; \vec{a}, \vec{b}, +) \neq p(\alpha_i; \vec{a}, \vec{b}, -) \quad \text{pero} \quad p(\alpha_i; \vec{a}, \vec{b}) = p(\alpha_i; \vec{a})$$

o sea que el experimento no permite telegrafía supraluminosa.

No es correcto, entonces, que la no-separabilidad signifique que en el mundo fenomenal se viole la causalidad relativista. Es con respecto a la **Realidad en Sí** que la no-separabilidad es relevante. Por tal razón se debe tener cuidado con afirmaciones un poco superficiales e imprecisas acerca de que la teoría del Big Bang y la no-separabilidad indicarían que todo el universo estaría interconectado. Si por "universo" se entiende todo el mundo de los fenómenos ese tipo de afirmaciones no es correcto. Y si por "universo" se quiere decir la Realidad en Sí no es necesario invocar el Big Bang para hacer las afirmaciones en cuestión, que aún así serían imprecisas.

La no-separabilidad no tiene nada que ver con el quantum de acción h .

En efecto: aún si se encuentra algún día que la mecánica cuántica es un caso particular de una teoría más general que permite explicar h , seguirán

siendo válidos los resultados experimentales que muestran la violación de la separabilidad. Debemos anotar también que la mecánica cuántica no juega ningún papel en la derivación de las desigualdades de Bell, ella se utiliza solamente para encontrar situaciones experimentales donde predice que se violarán las desigualdades.

La no-separabilidad no tiene nada que ver con el determinismo.

En efecto: en la formulación del principio de separabilidad no hemos postulado el determinismo.

La no-separabilidad y la indivisibilidad de Bohr apuntan en la misma dirección.

Antes que nada hay que recalcar que las dos nociones parten de concepciones filosóficas muy diferentes. La no-separabilidad sólo tiene sentido en el contexto de una concepción realista. En cambio las tesis de Bohr son puramente epistemológicas, pues en su concepción de la mecánica cuántica las consideraciones ontológicas no tienen lugar (18). Por **indivisibilidad** hacemos referencia a la idea implícita en la respuesta de Bohr a Einstein que vimos en la sección 1. Según esa respuesta no podemos **dividir conceptualmente** ni los sistemas entre sí ni los sistemas y los instrumentos de medida. Decir, entonces, que dos sistemas han interactuado durante un tiempo dado, que se han alejado después uno de otro, y preguntarse si existirá una interacción entre ellos cuando estén separados por un intervalo de género espacial, sería una manera ambigua de hablar.

Hay que anotar que en el caso de la no-separabilidad nos enfrentamos también a un tipo de indivisibilidad conceptual. En efecto: en la versión cuantitativa del principio de separabilidad, referida al caso cuántico de los dos sistemas U y V , se tiene que todo lo que cuenta son las fórmulas en las cuales no hay involucrados más que los λ y los resultados de medida. Todo puede reformularse en términos de los λ y los resultados de las medidas. Estrictamente, entonces, es sólo por comodidad de lenguaje que se habla de dos sistemas U y V .

En suma: la no-separabilidad y la indivisibilidad afirman que en un fenómeno cuántico los resultados de una medida efectuados sobre un sistema, no están en general determinados únicamente por variables locales. Entran en juego otras variables en regiones que pueden estar arbitrariamente alejadas.

7. LA NO-SEPARABILIDAD INDICA QUE LA REALIDAD FÍSICA NO ESTÁ EN EL ESPACIO-TIEMPO

En una concepción realista de la relatividad, el espacio-tiempo hace parte de la Realidad en Sí, es decir que existe independientemente de lo humano, de lo que conocen y deciden medir los humanos, de la existencia de los humanos. La Realidad física se inscribe, entonces, en el espacio-tiempo. También la distancia entre dos elementos de la Realidad tiene una existencia en sí, lo mismo que las relaciones causales entre los eventos que forman la Realidad. La causa precede siempre al efecto y los elementos separados por un intervalo de género espacial están causalmente separados. En suma: la localización espacio-temporal y la causalidad hacen parte de la Realidad en Sí.

Una suposición fundamental implícita en la formulación del principio de separabilidad es que la Realidad en Sí está inmersa en el espacio-tiempo. Si a pesar de la violación del principio de separabilidad se sostiene que la Realidad en Sí se encuentra en el espacio-tiempo, parece inevitable la aceptación de la existencia de influencias supraluminosas.

Con esa aceptación el realista se enfrenta a los problemas siguientes:

- i) ¿Cuál es la naturaleza de tales influencias? ¿Son una extensión de la idea ordinaria de causa? ¿Cómo pueden serlo si no obedecen el orden de sucesión temporal implícito en tal idea? Sabemos, en efecto, que si dos sucesos están separados por un intervalo de género espacial habrá siempre una distancia espacial entre ellos. Su separación temporal, en cambio, puede ser positiva, negativa o cero, según el sistema de referencia. Uno de los eventos puede ser el primero en un sistema de referencia, el segundo en otro sistema y puede haber otro sistema en que ambos eventos sean simultáneos. ¿Cómo lograr una extensión razonable de la idea de causa en el caso de las influencias supraluminosas, si un evento puede a la vez influir y ser influido por otro evento y ello según el sistema de referencia adoptado?
- ii) ¿Cómo explicar que la violación del principio de separabilidad sea precisamente la que predice la cuántica?

Hay al menos dos vías posibles de investigación de los anteriores problemas:

- a) Proponer la existencia de un éter o sistema de Lorentz R fundamental o privilegiado. Los otros sistemas de referencia parecen equivalentes a R debido a que las leyes que rigen los fenómenos son invariantes

bajo el grupo de Lorentz. La causalidad física no es válida sino en R . Si en R un evento P es la causa de otro evento P' separado de P por un intervalo de género espacial, entonces, en R , P siempre tiene que ser anterior a P' . Sin embargo habrán otros sistemas de referencia donde P' se verá como anterior a P . Solamente en R debe cumplirse la relación causal, solamente en R el tiempo es el tiempo físico "real". En cualquier otro sistema de referencia el tiempo no es más que una apariencia (19).

Además de los problemas i) y ii) antes mencionados, la teoría del éter se enfrenta al problema específico presentado por la imposibilidad de observar el sistema de referencia privilegiado. Ese problema hace a la teoría epistemológicamente inaceptable, pues postula como explicación de un problema físico fundamental una entidad en principio imposible de observar. El carácter puramente ad-hoc de este éter es, entonces, evidente.

- b) Otra posibilidad es aceptar la existencia de una forma de causalidad del futuro hacia el pasado que podemos llamar "causalidad retrógrada" (20). Ese tipo de causalidad remontaría, entonces, el tiempo y permitiría conectar causalmente dos eventos P y P' separados por un intervalo de género espacial. Basta considerar otro evento P'' en el pasado tanto de P como de P' y, por tanto, separado de éstos por intervalos de género temporal. La conexión causal entre P y P' podría lograrse, por ejemplo, por medio de una conexión causal retrógrada entre P y P'' seguida de una conexión causal ordinaria entre P'' y P' .

Uno de los graves problemas específicos a que se enfrenta esta teoría es explicar por qué en el mundo macroscópico no encontramos sino la causalidad ordinaria. La teoría debe mostrar cómo la causalidad retrógrada desaparece en el límite de grandes valores de spin. Sin embargo debe primero dar una definición precisa de la causalidad retrógrada, lo que no parece fácil dado el carácter contraintuitivo de esa noción que no exige que la causa sea siempre anterior a su efecto.

Es importante anotar que en otras versiones de la idea del éter (21), se considera que la invariancia de Lorentz no es más que una aproximación, lo que indicaría claramente que también el espacio-tiempo no es más que una aproximación y que, en consecuencia, no hace parte de la Realidad en Sí. En cuanto a la especulación sobre la causalidad retrógrada, la teoría más elaborada en ese sentido (22), da una definición de la causalidad en la que se

pierde la distinción entre causa y efecto. Uno se pregunta si una definición tal corresponde verdaderamente con el concepto de causalidad. Lo que resta finalmente de esa teoría es una concepción en la cual la Realidad no está inscrita en el espacio-tiempo (23).

Vemos entonces que las líneas de investigación propuestas para dar respuesta a la aceptación de influencias supraluminosas nos llevan a concepciones en las que la Realidad en sí no se concibe inmersa en el espacio-tiempo.

Ahora bien, ¿existen teorías o especulaciones mediante las cuales se pueden resolver los problemas que presenta la no-separabilidad, sin renunciar a la interpretación realista de la relatividad ni invocar la existencia de influencias supraluminosas?

Al menos una teoría y una especulación existen a ese respecto:

- a) La teoría es la de la relatividad de los estados de Everett (24), en la cual se postula que cada vez que un proceso de medida tiene lugar, el mundo real se divide en un número de mundos reales igual al número de valores propios distintos del operador que representa la cantidad medida. En el caso, por ejemplo, de dos partículas U y V de spin $1/2$ creadas en una fuente S en el estado "singlete", se tendría, después de la medida del spin de V , dos mundos reales cada uno con un observador: un mundo en el cual el valor medido es $\hbar/2\pi$ y otro en el que el valor es $-\hbar/2\pi$. A pesar de que cada experimentador no observa sino uno de los resultados, el otro resultado existe al mismo tiempo, sólo que en una rama diferente del universo donde lo observa la otra copia del experimentador. La argumentación que nos lleva a concluir que se viola el principio de separabilidad, se basa en la suposición implícita de que si se observa uno de los resultados de la medida del spin de V , el otro resultado posible no existe. Si así no fuese, es posible mostrar que la probabilidad de obtener uno de los resultados de la medida del spin de U no se afecta en ningún caso por la observación de uno de los resultados de la medida del spin de V (25).

Debemos recalcar que a pesar de que la teoría de Everett resuelve los problemas que presenta la no-separabilidad, las nociones de base de esa teoría son aún más alejadas de las concepciones humanas ordinarias que la no-separabilidad y la indivisibilidad. Por otra parte la teoría es inaceptable epistemológicamente dada la imposibilidad de observar las diferentes ramas del universo, por lo cual se tiene una proliferación infinita de no-observables.

- b) La especulación es la siguiente: en la formulación del principio de separabilidad se supone implícitamente que ciertos parámetros experimentales, como las direcciones $\vec{a}$, $\vec{b}$, son variables libres, o sea que los experimentadores tienen la libertad de escoger entre las posibilidades que les da su equipo. Sin embargo este "libre albedrío" podría ser ilusorio (26) y estar determinado por un evento en el pasado. Dicho de modo más preciso, el cono de luz del pasado de los dos eventos constituidos por las escogencias de la dirección $\vec{a}$ y la dirección $\vec{b}$ por parte de los dos experimentadores, uno cerca al sistema U y el otro cerca al sistema V , eventualmente se superpondrán. Uno puede imaginar un evento en la región donde se superponen que controle la decisión futura de los experimentadores (27).

La especulación anterior es inaceptable metodológicamente a menos que se proponga una conexión causal específica, ya que siempre es posible suponer, en cualquier experimento en que dos o más variables se consideran libres, que algún factor en la superposición de los conos de luz del pasado controla las variables que se consideran libres. Es evidente que este tipo de suposición le resta valor a prácticamente todos los resultados de la investigación científica (28).

Parece entonces que nuestro análisis crítico de las posibilidades que tiene el realista para resolver las dificultades que presenta la no-separabilidad nos llevan a una sola conclusión: que lo más razonable es aceptar que la Realidad en Sí no se encuentra en el espacio-tiempo y que este último, al igual que la causalidad ordinaria, no es sino parte de nuestro marco conceptual adaptado a la descripción de nuestra experiencia.

Es interesante anotar que el realista se une entonces a Bohr en una de sus tesis fundamentales. Bohr, en efecto, no considera que la causalidad y el espacio-tiempo sean parte de la Realidad en Sí. El sostiene que el objeto de la ciencia no es la descripción de una tal Realidad, sino únicamente la descripción sin ambigüedad de la experiencia humana. La causalidad y el espacio tiempo son para él parte esencial del único lenguaje de que disponemos para comunicar sin ambigüedad la experiencia humana y forman, por ello, parte del marco conceptual destinado a organizar esa experiencia (29).

Podemos concluir entonces que un partidario de la concepción realista que quiera ser coherente con los datos actuales de la ciencia, estará, en cuanto a la tesis de una Realidad en Sí inscrita en el espacio tiempo, más cerca de Bohr que de Einstein, quizás sin tener mucha conciencia de ello.

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mis agradecimientos al Profesor Bernard d'Espagnat por las valiosas sugerencias que me hizo sobre la manera como debe entenderse la no separabilidad.

Referencias

1. Einstein, A., Podolski, B., Rosen, N.; *Phys. Rev.* 47, p. 777-784. (1935)
2. Bohr, N.; *Phys. Rev.* 48, p. 696-702. (1935)
3. Roldán, J.; *Langage, Mécanique Quantique et Réalité*, Tesis de Doctorado, Paris, (1990).
4. *Según la frase de Paul Valéry.*
5. Ver por ejemplo: d'Espagnat, B.; *Une incertaine réalité*. Gauthier Villars, Paris, (1985).
6. Ver por ejemplo: Ref. (5).
7. Ref. (5).
8. Ref. (5).
9. Ref. (5).
10. Ver por ejemplo: d'Espagnat, B.; *Phys. Rep.*, Vol.110, No. 4 p. 203-264. (1984).
11. Aspect, A., Dalibard, J., Roger, G.; *Phys. Rev. Lett.* Vol 49, No. 25, p. 1804-1807. (1982).
12. Con la excepción de una pequeña minoría que invoca, entre otras cosas, "conspiraciones" de la naturaleza.
13. Stapp, H.P.; *Phys. Rev.D.* Vol. 3, No. 6, p. 1303-1320. (1971).
14. Stapp, H.P., *Nuovo Cimento*. Vol. 40 B, No 1, p. 191-204. (1977)
15. Mermin, N.D.; *Phys. Rev.* Vol 22, No 2, p. 356-361. (1980).
16. Ref. (15).

17. Ver por ejemplo: Bohm, D.; *Quantum Theory*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, (1951).
18. Ver por ejemplo: Ref. (3).
19. Eberhard, P.H.; *Nuovo Cimento*. Vol. 46, No 2, p. 392-419. (1978).
20. Costa de Beauregard O.; *Proc. of Int. Symp. Foundations of Quantum Mechanics..* Tokio, (1983).
21. Ref. (19).
22. Ref. (20).
23. Ref. (5).
24. Everett, H.; *Rev. of Mod. Phys.* Vol. 29, No. 3, p. 454-462. (1957).
25. Bilbol, M.; *Phys. Lett.*, 96 A No. 2, p. 66-70. (1983).
26. Bell, J.S.; *Speakable and unspeakable in quantum mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge, p.52. (1987).
27. Shimony, A., Horne, M.A., Clauser, J. F.; *Epist. Lett.* 13 Oct. 1976.
28. Ref. (27).
29. Ref. (3).