

# Teoría cuántica y realidad

Bernard d'Espagnat

ENERO, 1980

*La doctrina de que el mundo está formado por objetos cuya existencia es independiente de la conciencia humana se halla en conflicto con la mecánica cuántica y con hechos que se han establecido experimentalmente*

Cualquier teoría buena en ciencias físicas debe hacer predicciones detalladas. Dado un experimento bien definido, la teoría ha de especificar correctamente el resultado, o al menos debe asignar probabilidades correctas a todos los resultados posibles. Desde este punto de vista, la mecánica cuántica puede considerarse extraordinariamente buena. En su calidad de teoría moderna fundamental de los átomos, de las moléculas, de las partículas elementales, de la radiación electromagnética y del estado sólido suministra métodos para calcular los resultados de la experimentación en todos estos campos.

Pero, aparte de una confirmación experimental, podemos pedirle algo más a una teoría. Se espera que no sólo sea capaz de determinar los resultados de un experimento, sino que nos dé también alguna comprensión de los sucesos físicos que presumiblemente sustentan los resultados observados. En otras palabras, la teoría no debe conformarse con dar la posición de una aguja sobre una escala, sino que ha de explicar por qué la aguja toma aquella posición. Cuando se desea que la teoría cuántica proporcione información de esta clase surgen algunas dificultades conceptuales. Por ejemplo, la mecánica cuántica representa una partícula elemental, el electrón, mediante una expresión matemática llamada función de ondas, que suele describirlo como si se hallara esparcido por una amplia región del espacio.

Esta representación no está en contradicción con la experiencia; por el contrario, la función de ondas da, de forma exacta, la probabilidad de hallar el electrón en un cierto lugar. Sin embargo, cuando el electrón se detecta realmente, nunca está esparcido, sino que tiene una posición definida. No está, pues, totalmente claro cuál sea la interpretación física que deba asignarse a la función de ondas

o qué idea hayamos de formarnos sobre qué sea un electrón. A causa de estas ambigüedades, muchos físicos encuentran más adecuado considerar la mecánica cuántica como un mero conjunto de reglas que permite predecir los resultados de los experimentos. De acuerdo con este punto de vista, la teoría cuántica trataría sólo de los fenómenos observables (la posición de las agujas de los instrumentos de medida), pero no de los hechos físicos subyacentes (la posición real del electrón).

Resulta ahora que ni siquiera esta renuncia es enteramente satisfactoria. Aceptando incluso que la mecánica cuántica no sea más que un conjunto de reglas, sigue hallándose en conflicto con una idea del mundo que mucha gente considera obvia y natural, idea que se basa en tres hipótesis, o premisas, que deben aceptarse sin demostración. Una es el realismo, la doctrina que establece que las regularidades apreciadas en los fenómenos observados están causadas por alguna realidad física cuya existencia es independiente del observador. La segunda premisa establece que la inferencia inductiva es una forma válida de razonamiento, que puede aplicarse libremente; por tanto, pueden deducirse conclusiones legítimas a partir de observaciones coherentes. La tercera es la llamada separabilidad de Einstein o localidad de Einstein; establece que ninguna clase de influencia puede propagarse más rápidamente que la velocidad de la luz. Las tres premisas, que suele considerarse que encierran verdades bien establecidas e incluso verdades totalmente evidentes, forman la base de lo que llamaremos teorías realistas locales de la naturaleza. La argumentación a partir de tales premisas conduce a una predicción explícita de los resultados de una determinada clase de experimentos en física de partícu-

las elementales. También podemos acudir a las reglas de la mecánica cuántica para calcular los resultados de los mismos experimentos. Los resultados que se obtienen son distintos. Por tanto, o las teorías realistas locales o la mecánica cuántica tienen que ser falsas.

Los experimentos en cuestión se propusieron inicialmente como "experimentos imaginarios", esto es, experimentos puramente ideales. Sin embargo, en los últimos años se han llevado a término varias versiones de los mismos con aparatos reales. Aun cuando no todos los resultados son coherentes entre sí, la mayoría están de acuerdo con las predicciones de la mecánica cuántica, por lo que parece que son las predicciones de la mecánica cuántica las que habrían quedado confirmadas, salvo que coincidencias extraordinarias hubiesen distorsionado los resultados. La consecuencia es que las teorías realistas locales son, muy probablemente, erróneas. Aunque las tres premisas sobre las que se basan estas teorías son fundamentales para una interpretación del mundo conforme al sentido común, hasta el punto de que la mayoría de la gente las abandonaría de muy mala gana, todo parece indicar que habrá que desechar al menos una de ellas, aunque quizá bastase con modificarla o con restringir su alcance.

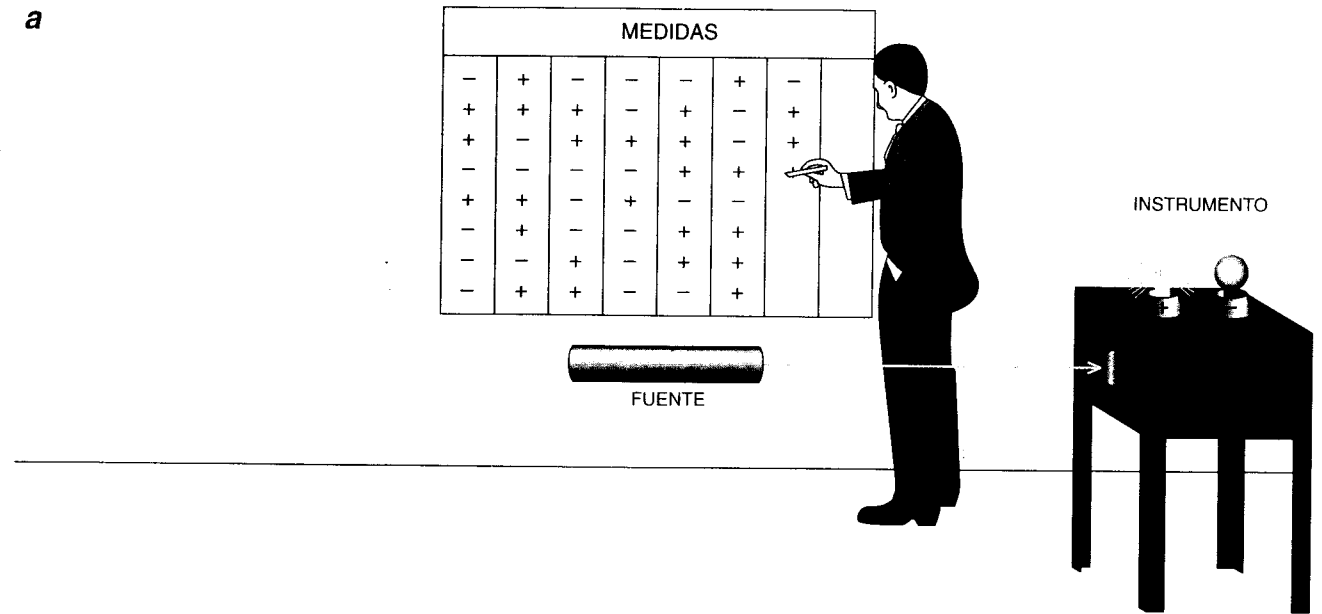
Los experimentos se refieren a las correlaciones entre sucesos distantes y a las causas de las mismas. Sean, por ejemplo, dos partículas que disten entre sí unos metros; supongamos que se descubre que tienen valores idénticos de alguna propiedad, verbigracia la carga eléctrica. Si este resultado se obtiene una vez o unas cuantas veces, puede admitirse que se trata de una casualidad, pero si la correlación se detecta de forma coherente en muchas mediciones, se precisa una explicación más sistemá-

a

MEDIDAS							
-	+	-	-	-	+	-	
+	+	+	-	+	-	+	
+	-	+	+	+	-	+	
-	-	-	-	+	+		
+	+	-	+	-	-		
-	+	-	-	+	+		
-	-	+	-	+	+		
-	+	+	-	-	+		

FUENTE

INSTRUMENTO



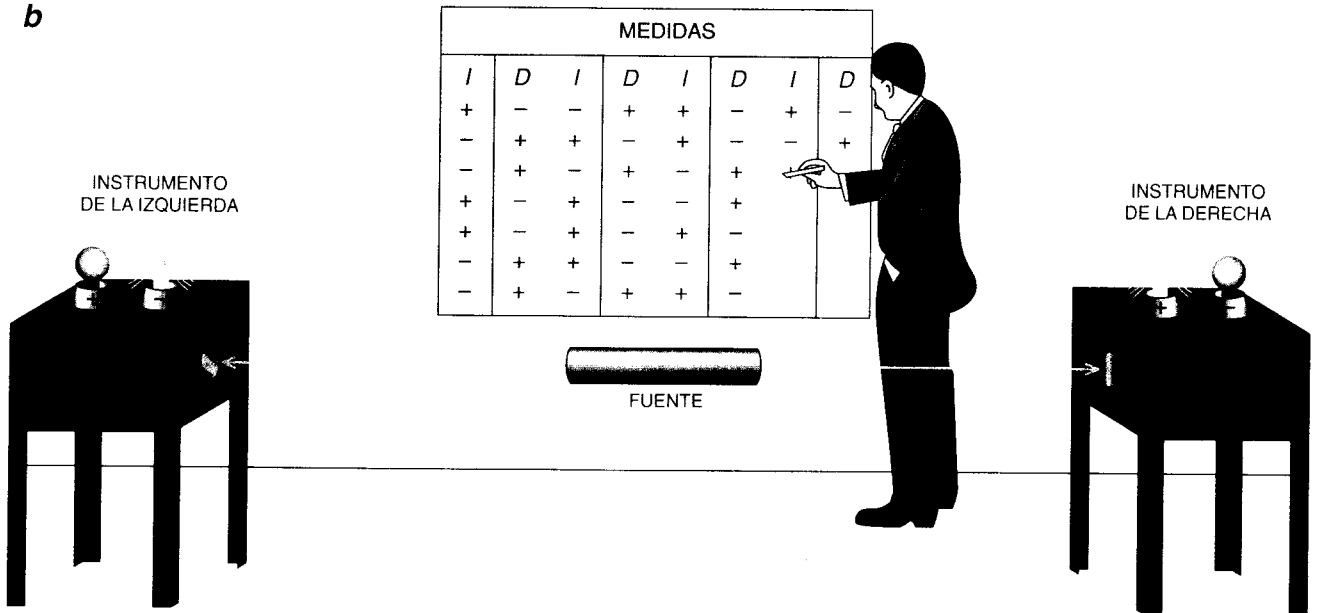
b

MEDIDAS							
<i>I</i>	<i>D</i>	<i>I</i>	<i>D</i>	<i>I</i>	<i>D</i>	<i>I</i>	<i>D</i>
+	-	-	+	+	-	+	-
-	+	+	-	+	-	-	+
-	+	-	+	-	+		
+	-	+	-	-	+		
+	-	+	-	+	-		
-	+	+	-	-	+		
-	+	-	+	+	-		

FUENTE

INSTRUMENTO DE LA IZQUIERDA

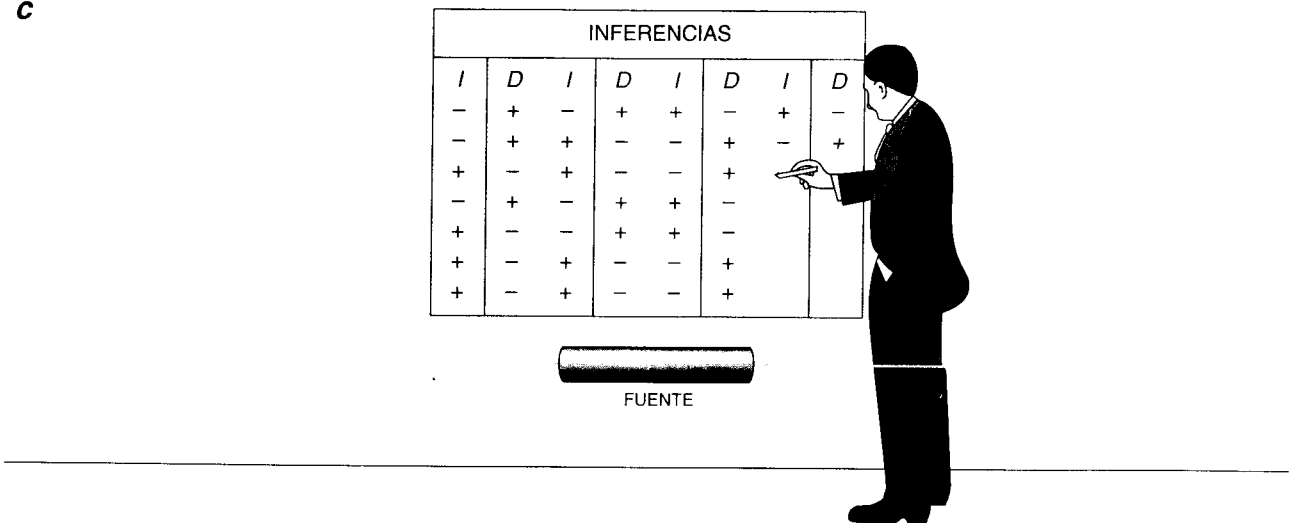
INSTRUMENTO DE LA DERECHA



c

INFERENCIAS							
<i>I</i>	<i>D</i>	<i>I</i>	<i>D</i>	<i>I</i>	<i>D</i>	<i>I</i>	<i>D</i>
-	+	-	+	+	-	+	-
-	+	+	-	-	+	-	+
+	-	+	-	-	+		
-	+	-	+	+	-		
+	-	-	+	+	-		
+	-	+	-	-	+		
+	-	+	-	-	+		

FUENTE



tica. Nada cambiaría si los valores medidos fueran siempre opuestos en lugar de iguales; la correlación sería entonces negativa, pero su magnitud sería la misma y resultaría igualmente improbable que se debiera al azar.

Cuando se afirma que hay que sobreentender una correlación coherente entre tales sucesos, o que no existe nada misterioso en ello, se está refiriendo uno de alguna forma a la causalidad. O bien un suceso origina el otro o ambos tienen una causa común. Mientras no se da con esa relación, la mente no descansa satisfecha. Más aún, no es posible que lo haga aun cuando se conozcan reglas empíricas para predecir correlaciones futuras. En la antigüedad se observó una correlación entre las mareas y el movimiento de la Luna y se formularon reglas para predecir mareas futuras basadas en esos datos. Pero hasta que Newton no formuló la teoría de la gravitación universal no pudo afirmarse que se conociera la causa de las mareas.

La necesidad de explicar las correlaciones observadas apremia tanto a los físicos que, a veces, postulan causas comunes, aunque no existan más pruebas de ellas que la misma correlación. Que esta forma de proceder sea o no justificable es lo que constituye el meollo del conflicto entre la mecánica cuántica y las teorías realistas locales. Las correlaciones en cuestión se presentan cuando se observan partículas subatómicas, caso en el que la descripción mecánico-cuántica, con todos sus azares epistemológicos, se hace indispensable. Podemos dar

una idea del tipo de predicción que hacen las teorías realistas locales considerando la explicación de las correlaciones entre sucesos distantes en un contexto más familiar, caso en el que no es necesario apelar a la mecánica cuántica.

Imaginemos que un psicólogo hubiese ideado una prueba sencilla que siempre se resolviera bien o mal, sin que cupiese ambigüedad en los resultados. El psicólogo sabría, tras haberla aplicado, que algunos sujetos la superan mientras que otros fracasan; pero no sabría qué es lo que distingue a ambos grupos, salvo en lo referente a los propios resultados. En otras palabras, no podría decir que la prueba midiese ninguna aptitud o capacidad real de los sujetos ni que los resultados no fuesen completamente fortuitos.

Aunque parezca no haber solución general para este problema, hay un caso especial en el que quizá pudiese resolverse. Supongamos que la prueba no se aplicase a un conjunto de individuos, sino a otro de matrimonios, y que se detectase una gran correlación en las contestaciones. El procedimiento podría consistir en separar a los maridos de las mujeres antes de la prueba, sometiéndolos a ella por separado. Al analizar los resultados volvería a verse que una parte de los sujetos respondió bien y la otra mal, con la peculiaridad de que cuando el marido "aprobó" lo hizo también su mujer, mientras que, cuando fracasó el marido, tampoco tuvo éxito su mujer.

Si la correlación persistiese tras haber realizado la prueba con muchos matrimonios, el psicólogo podría con-

cluir con gran seguridad que la respuesta individual no se debe al azar en el momento de la prueba, sino que ésta ha de revelar alguna propiedad o habilidad real de los individuos. Esta propiedad tienen que poseerla los sujetos antes del ejercicio y antes de haberlos separado. El azar pudo incidir de algún modo en el desarrollo de la propiedad, ya que no todas las parejas la poseían, pero esa incidencia debió actuar en algún instante anterior a la separación por sexos. En ese período previo, en que los maridos y mujeres estaban juntos, fue cuando pudieron adquirir alguna característica que les habría de permitir contestar coherentemente de la misma forma. Así pues, la correlación queda explicada atribuyéndola a una causa común anterior a la prueba.

Antes de llegar a esta conclusión habría que excluir otra posible explicación, la de que los maridos y las mujeres se hubieran comunicado durante la realización del ejercicio. Si tal hubiera pasado, no tendría que existir una característica común previa a la prueba. El cónyuge que hubiera realizado la prueba en primer lugar hubiera podido escoger la respuesta al azar y habérsela comunicado luego al otro, creando así la correlación observada. No es difícil evitar subterfugios de esta clase al realizar una prueba psicológica. En un caso extremo, los ejercicios podrían realizarse de forma estrictamente simultánea, mientras que maridos y mujeres estarían situados en lugares tan alejados que ninguna señal que se moviera a velocidad inferior a la de la luz pudiera llegar a tiempo de ser utilizada.

Una vez aclarado que la prueba mide una propiedad real, el psicólogo podría dar un paso adelante y obtener una inferencia inductiva. Si las parejas probadas constituían una muestra no sesgada de una población de parejas, que satisficiera ciertas condiciones estadísticas, podría inferirse que cualquier pareja de la misma población estaría formada por un marido y una mujer que poseerían o no la propiedad medida por la prueba, pero siempre ambos conjuntamente. Por el mismo principio pudiera concluirse que, en cualquier muestra grande y no desviada de parejas que aún no la hubiesen realizado, habrá matrimonios que tendrían la propiedad y otros que carecerían de ella. La seguridad de estas afirmaciones se va acercando al estado de certeza a medida que aumenta el tamaño de la muestra. Se llega así a la conclusión de que tanto la correlación entre los miembros de las parejas como las diferencias entre

**1. LAS CORRELACIONES ENTRE SUCESOS DISTANTES** pueden fundamentar conclusiones acerca de la estructura del mundo. Supongamos que un físico preparase un dispositivo experimental que lanzase partículas subatómicas individuales, protones por ejemplo, sobre un instrumento, pudiendo obtenerse sólo dos resultados: más y menos (*a*). Observa que el resultado obtenido es más en el caso de algunos protones y menos en el de otros, sin que pueda decir si el instrumento está midiendo alguna propiedad real de los protones o se limita a registrar fluctuaciones al azar. Podría preparar entonces dos instrumentos idénticos y una fuente que emita dos protones simultáneamente (*b*). En estas condiciones descubre una correlación negativa estricta: siempre que un instrumento lee más, el otro lee menos. Esta correlación le permite concluir que los resultados se deben a una propiedad real de los protones, cuyo valor ya está determinado antes de que los protones abandonen la fuente. Si la muestra de partículas medidas satisficiera ciertas pruebas estadísticas, podría inferir que todo par de protones emitidos por la fuente está constituido por un protón con la propiedad más y otro con la propiedad menos, aun cuando no se someta al proceso de medición a ninguno de ellos (*c*). Las conclusiones son razonables si se aceptan como válidas las tres premisas siguientes: 1) al menos algunas propiedades del mundo tienen una existencia independiente del observador; 2) la inferencia inductiva puede aplicarse libremente y 3) una medición hecha con un instrumento no influye en el resultado de otra realizada con el otro instrumento. Una forma más restrictiva de esta última premisa no prohíbe tales influencias más que si las dos mediciones fuesen tan simultáneas que el influjo tuviese que propagarse a velocidad superior a la de la luz. Podemos llamar a estas premisas realismo, uso libre de la inducción y separabilidad, respectivamente. La versión más restrictiva de la premisa de separabilidad se llama separabilidad o localidad de Einstein. Cualquier teoría que las incorpore es una teoría realista local.

ellas son aplicables también a la parte de población no sometida a la prueba.

Estas conclusiones se basan en las tres premisas que constituyen el fundamento de las teorías realistas locales. El realismo es una hipótesis necesaria si creemos que hay pruebas que miden propiedades estables cuya existencia sea independiente del experimentador. Fue necesario suponer la

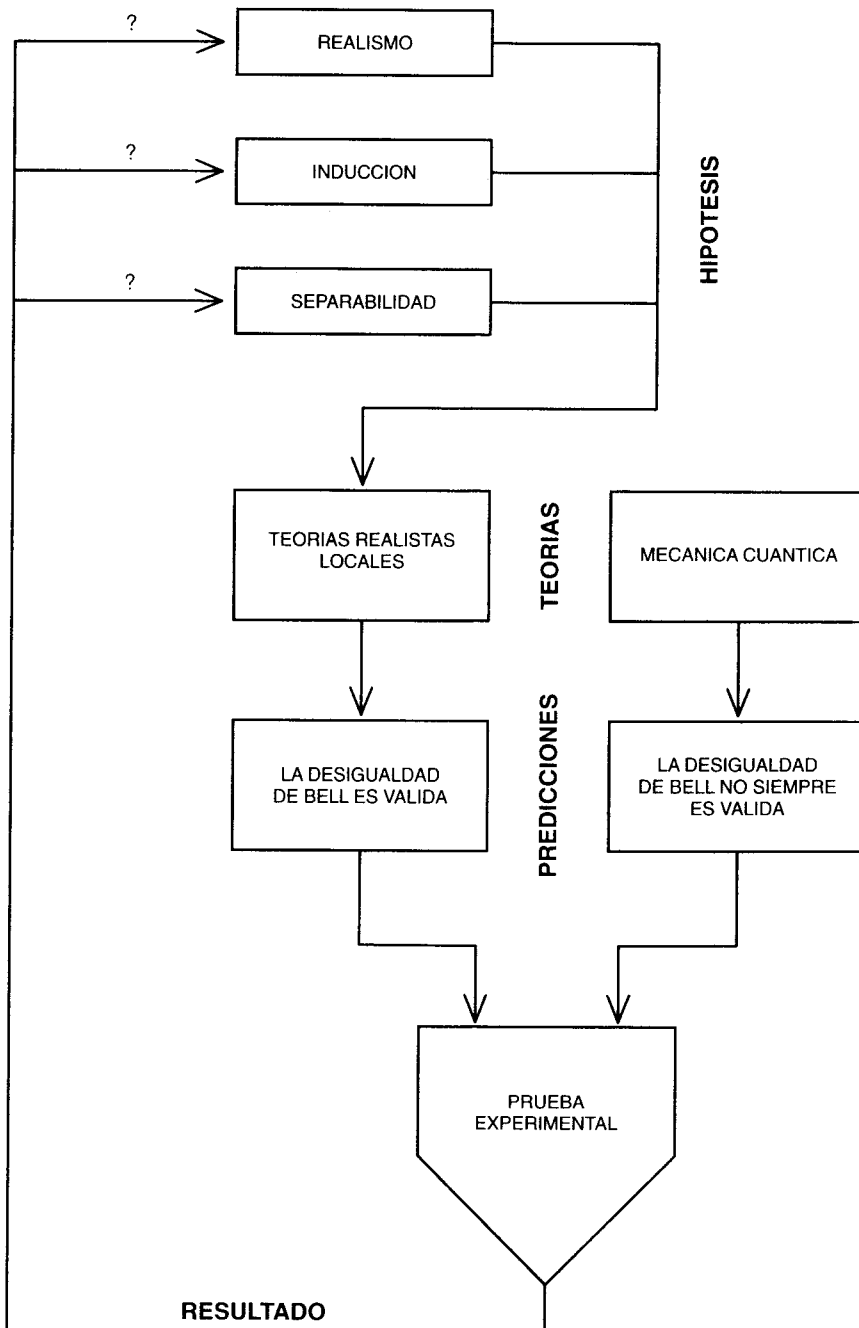
validez de la inferencia inductiva para extrapolar los datos observados a la parte de la población que no había realizado el ejercicio. La separabilidad se incorporó en la hipótesis de que maridos y mujeres no pudieran comunicarse entre sí durante la prueba. Si éstas se realizaron en estricta simultaneidad, de forma que cualquier señal que pasara de unos a otros tuviera que

propagarse con velocidad mayor que la de la luz, tal hipótesis equivale a la separabilidad de Einstein.

A primera vista, las conclusiones extraídas de esta experiencia psicológica hipotética parecen deducirse de forma totalmente natural de los datos. Un epistemólogo podría objetar, sin embargo, que las conclusiones son inciertas. Sobre todo un epistemólogo que conociera los fundamentos de la mecánica cuántica podría argumentar que ninguna necesidad lógica nos obliga a aceptar las tres premisas del razonamiento del psicólogo; por consiguiente, tampoco sería necesario concluir que existiera una correlación entre maridos y mujeres antes de someterse a la prueba, ni que hubiera diferencias entre las parejas antes de realizarla. Al psicólogo no le parecerían serias, a buen seguro, esas objeciones y las consideraría expresión de una duda infundada o de la creencia, muy poco científica, en paradojas. En la bibliografía relativa a la mecánica cuántica hallamos muchos argumentos como éste, o equivalentes, encaminados todos a probar que las correlaciones o diferencias no tenían por qué existir antes de ser medidas.

Característica singular de la mecánica cuántica es que sus predicciones no suelen ofrecer más que la probabilidad de un resultado, no la afirmación determinista de que el suceso tendrá o no lugar. La función de onda empleada para describir el movimiento de una partícula elemental se interpreta con frecuencia de forma probabilística: la probabilidad de encontrar la partícula en un cierto punto es proporcional al cuadrado de la función de onda en ese punto. Como expuse antes, la función de onda puede hallarse a veces esparcida por una zona amplia; ello implica que la probabilidad pueda estar igualmente repartida. Por supuesto, cuando se realiza una medición en un punto determinado, la partícula se detecta o no se detecta; se habla entonces de que la función de onda se desploma. Supongamos que se detecta la partícula. Desde el punto de vista epistemológico la cuestión que interesará dilucidar entonces será: ¿ocupaba la partícula esa posición antes incluso de haberse realizado la medición?

Las conclusiones del psicólogo, si pudieran trasladarse a este contexto, implicarían que la posición de la partícula estaba bien definida desde el principio, de la misma forma que la habilidad descubierta en algunos miembros de una muestra preexistía a la realización de la prueba. Según este razonamiento, la posición de la



**2. LAS TEORIAS REALISTAS LOCALES y la mecánica cuántica hacen predicciones discordantes sobre ciertos experimentos en los que se correlacionan sucesos distantes. Las primeras afirman que se cumplirá determinada relación, la desigualdad de Bell, mientras que la mecánica cuántica pronostica una violación de la misma. Hay pruebas experimentales sólidas de que la desigualdad resulta violada de la forma que predice la mecánica cuántica. Parece pues insostenible la defensa de teorías realistas locales. Una de las hipótesis sobre las que se basan estas teorías tiene que ser falsa.**

partícula nunca estuvo indeterminada; lo único que pasaba es que el observador la desconocía.

Gran parte de la plana mayor de los físicos expertos en mecánica cuántica estaría en desacuerdo. Pero no todos; Einstein se mostró, a lo largo de su vida, reticente ante la naturaleza probabilística de las interpretaciones que solían darse en mecánica cuántica. La mayoría de sus críticas incisivas a esas interpretaciones se fundaba en un razonamiento que se asemeja en cierto sentido al que yo he atribuido al psicólogo. En 1935 Einstein publicó un trabajo con dos jóvenes colegas, Boris Podolsky y Nathan Rosen, en el que formuló explícitamente sus objeciones. No afirmaba que la teoría cuántica fuera falsa; suponía que, por lo menos, algunas de sus predicciones tenían que ser correctas. Lo que proponía sencillamente era que la descripción mecánico-cuántica de la naturaleza resultaba incompleta o aproximada. El movimiento de una partícula debe describirse en términos de probabilidades, decía, por la única razón de que algunos de los parámetros que determinan el movimiento todavía no han sido especificados. En cuanto los valores de estas hipotéticas "variables ocultas" lleguen a conocerse, se podrá definir una trayectoria totalmente determinista.

Contra la propuesta de Einstein se han formulado numerosos contraargumentos. Por ahora mencionaré sólo uno de ellos, que se funda en el criterio de utilidad y mantiene que es irrelevante que existan o no variables ocultas, que se den diferencias entre los matrimonios en ausencia de pruebas. Aun cuando existieran, no deberían incorporarse a ninguna teoría ideada para explicar las observaciones; podría decirse, por tanto, que carecen de existencia científica. La exclusión de las variables ocultas queda justificada por la conjunción de tres hechos. Primero, el formalismo matemático de la teoría se simplifica si prescindimos de las variables ocultas. Segundo, este formalismo simplificado predice resultados que la experimentación confirma. Tercero, la adición de variables ocultas a la teoría no generaría nuevas predicciones que pudieran verificarse. Por tanto, la afirmación de que existen variables ocultas trasciende el alcance de los experimentos y no es una proposición de la física, sino de la metafísica.

Esta forma de defenderse de la interpretación clásica de la mecánica cuántica elimina cualquier tipo de variable oculta como superflua y, en

última instancia, quizá disparatada. Pero hay avances teóricos recientes que demuestran que la situación es muy distinta. La hipótesis de que existen variables ocultas sí que conduce a predicciones experimentales que difieren de las obtenidas por la mecánica cuántica. Las teorías con variables ocultas y las teorías realistas locales, en general, limitan la distancia que puede separar a ciertos sucesos para que puedan correlacionarse; la mecánica cuántica, por el contrario, predice que, en algunas circunstancias, el límite pudiera superarse. Por tanto, debería poderse idear una prueba experimental que discriminara entre ambas teorías, al menos en principio.

Supongamos que un físico hubiese inventado un experimento que pudiera efectuarse con partículas subatómicas, protones por ejemplo. Tras muchos intentos, descubre que unos protones pasan la prueba y otros no, aunque no sabe si está midiendo alguna propiedad real de los protones u observando simplemente las fluctuaciones aleatorias de su aparato. Trata, pues, de aplicarla a pares de protones, no a protones individuales. Los protones que constituyen un par están inicialmente muy próximos, acercados por un procedimiento bien definido que es el mismo para todos los pares. Se permite luego que los protones se separen; cuando se han alejado a cierta distancia macroscópica, se les somete a prueba, simultáneamente para algunos pares y con un intervalo de tiempo entre pruebas para los pares restantes. El físico descubre una estricta correlación negativa: cuando, en un par, un protón pasa la prueba, el otro falla invariablemente.

La situación del físico se parece mucho a la del psicólogo que realiza pruebas con parejas, pudiendo aplicarse el mismo razonamiento a los resultados del experimento físico. Si se aceptan como premisas el realismo, el uso libre de la inducción y la separabilidad de Einstein, el físico tendrá razones para concluir que la prueba mide alguna propiedad real de los protones. Para que la correlación pueda explicarse, la propiedad debe preexistir a la separación de los protones de cada par y el valor que tenga en ellos ha de estar definido desde el momento en que se produzca hasta que se realice el experimento. Es más, si prepara nuevos pares de protones por el mismo procedimiento, el físico sabrá que, en todos los casos, un protón tendrá la propiedad y el otro no, aun cuando no se someta a prueba a ninguno de ellos.

¿Hay algún experimento real que

pueda acometerse con partículas subatómicas y que produzca resultados análogos? Existe. Se trata de la medición de una componente cualquiera del espín de la partícula, componente que se defina a lo largo de un eje arbitrario. El espín atribuido a una partícula subatómica no se parece al momento angular de rotación de un cuerpo macroscópico, como pudiera ser la Tierra, más que en algunos aspectos, pero ahora no necesitamos entrar en los detalles de cómo se trata el espín en mecánica cuántica. Baste decir que el espín de una partícula se representa mediante un vector, o flecha, que podemos imaginar ligado a ella. La componente del espín a lo largo de cualquier eje del espacio tridimensional es la proyección del vector sobre dicho eje. Una propiedad bien establecida, aunque no menos sorprendente, de los protones (y de muchas otras partículas) es que, cualquiera que sea el eje elegido para medir la componente del espín, los resultados pueden tomar únicamente dos valores, que llamaré más y menos. (La medición de la componente del momento angular de rotación de la Tierra daría distintos resultados, según la dirección de la componente; y tendría cualquier valor, desde cero hasta el momento angular total del planeta.)

Se observa una correlación estrictamente negativa entre las componentes del espín cuando se juntan dos protones en la configuración mecánico-cuántica llamada estado singlete. En otras palabras, si dejamos que dos protones en estado singlete se separen y se mide luego la misma componente del espín en ambas partículas, será siempre más para un protón y menos para el otro. No hay forma conocida de predecir qué partícula tendrá la componente más y cuál poseerá la componente menos, pero ello no obsta para que la correlación negativa esté bien establecida. La situación es la misma para cualquier componente del espín que el físico decida medir, con tal que se mida la misma componente en ambas partículas. Tampoco importa cuánto se hayan alejado los dos protones antes de realizar la medición, mientras no se presenten influencias perturbadoras en sus trayectos, como pudieran ser otras partículas o radiaciones.

En lo concerniente a esta sencilla medición no hay razón de conflicto entre las predicciones de la mecánica cuántica y las de las teorías realistas locales. Pero pueden aparecer las discrepancias si el experimento se complica algo más.

El vector que representa el espín de una partícula se define mediante las

componentes a lo largo de tres ejes en el espacio, que no forman necesariamente ángulos rectos entre sí. Para el vector asociado con un objeto macroscópico de la vida normal, podría darse por supuesto, y con toda razón, que las tres componentes tienen valores definidos en cualquier instante. Que desconozcamos quizás el valor de una de ellas no equivale a su indefinición. Pero cuando se aplica esta hipótesis al vector de espín de una partícula resulta muy sospechosa; en la interpretación normal de la mecánica cuántica se la rechaza, de hecho, como un ejemplo de teoría con variables ocultas. El problema es que no se puede imaginar, ni siquiera en el terreno de los principios, ningún experimento que aportara información sobre los valores simultáneos de las tres componentes. Un aparato puede medir únicamente una componente del espín. Y, al hacerlo, altera de ordinario los valores de las otras componentes. Por tanto, para conocer los valores de las tres componentes deberían hacerse tres mediciones sucesivas. Cuando la partícula saliera del tercer aparato no tendría ya las mismas componentes del espín que cuando entró en el primero.

Aunque los instrumentos sólo puedan medir una componente del espín cada vez, sí podemos construir un aparato que la mida a lo largo de uno de los tres ejes elegidos arbitrariamente. Designaré estos ejes por  $A$ ,  $B$  y  $C$  e indicaré los resultados de los experimentos como sigue: si resulta que la componente del espín a lo largo del eje  $A$  es más, se indicará por  $A^+$ ; si la componente a lo largo del eje  $B$  es menos, escribiremos  $B^-$ , y así sucesivamente. El físico puede preparar ya una gran muestra de protones en el estado singlete. Observará que si mide la componente  $A$  para ambos protones de un par, unos tendrán  $A^+$  y otros tendrán  $A^-$ , pero siempre que un miembro del par sea  $A^+$ , el otro miembro será siempre  $A^-$ . Si decide medir, en vez de la componente  $A$ , la componente  $B$ , hallará la misma correlación negativa: cuando un protón sea  $B^+$ , su compañero del singlete será  $B^-$ . De modo parecido, un protón  $C^+$  está invariablemente acompañado por un  $C^-$ . Estos resultados son válidos con independencia de la orientación de los ejes  $A$ ,  $B$  y  $C$ .

Importa destacar que, en estos experimentos, no se somete ningún protón a una medición de más de una componente de su espín. Pero si el físico acepta las tres premisas de las teorías realistas locales, puede dedu-

cir, a partir de sus resultados, conclusiones acerca de los valores de las tres componentes, siguiendo un razonamiento muy parecido al del psicólogo del ejemplo inicial. Si considera un nuevo grupo de pares de protones en el estado singlete, en el que no se hayan realizado todavía mediciones del espín (y en el que quizá nunca se hagan), puede inferir que un protón de cada par tiene la propiedad  $A^+$  y el otro la propiedad  $A^-$ . De forma análoga, puede concluir que, en cada par, un protón goza de la propiedad  $B^+$  y el otro de la  $B^-$  y que uno muestra la propiedad  $C^+$  y el otro la  $C^-$ .

Estas conclusiones exigen una sutil, e importante, ampliación del significado asignado a las notaciones del tipo  $A^+$ . Antes  $A^+$  no era más que un posible resultado de una medición de la partícula; ahora se ha convertido, merced a este razonamiento, en un atributo de la partícula misma. Para ser explícitos, si un protón no sujeto a medición detenta la propiedad de que una medición a lo largo del eje  $A$  dé el resultado definido por  $A^+$ , entonces se dice que el protón tiene la propiedad  $A^+$ . En otras palabras, el físico se ha visto forzado a concluir que los protones de cada par poseen componentes del espín bien definidas en cada instante. Podemos desconocerlas, ya que no puede decirse qué protón del par es el que tiene la propiedad  $A^+$  y cuál la propiedad  $A^-$  en tanto no se haya realizado la correspondiente medición a lo largo del eje  $A$ , pero puede mantenerse, a partir de las premisas de teorías realistas locales, que los valores están bien definidos incluso en ausencia de cualquier tipo de medición. Este punto de vista es contrario a la interpretación tradicional de la mecánica cuántica, pero ninguno de los hechos presentados hasta ahora la ha contradicho todavía.

Cuando se mide una misma componente del espín de protones que se encuentran en estado singlete se obtiene una correlación negativa estricta. ¿Qué sucede cuando los instrumentos se disponen para que midan distintas componentes del espín? Para precisar, consideremos el siguiente experimento. Se juntan pares de protones en un estado singlete por el mismo método empleado en los experimentos anteriores; se permite su separación bajo las mismas condiciones exactamente. Medimos una componente del espín,  $A$ ,  $B$  o  $C$ , de cada protón, pero se determina de forma totalmente aleatoria cuál sea la que vamos a medir en cada caso. A veces se medirá la misma componente del espín en ambos protones;

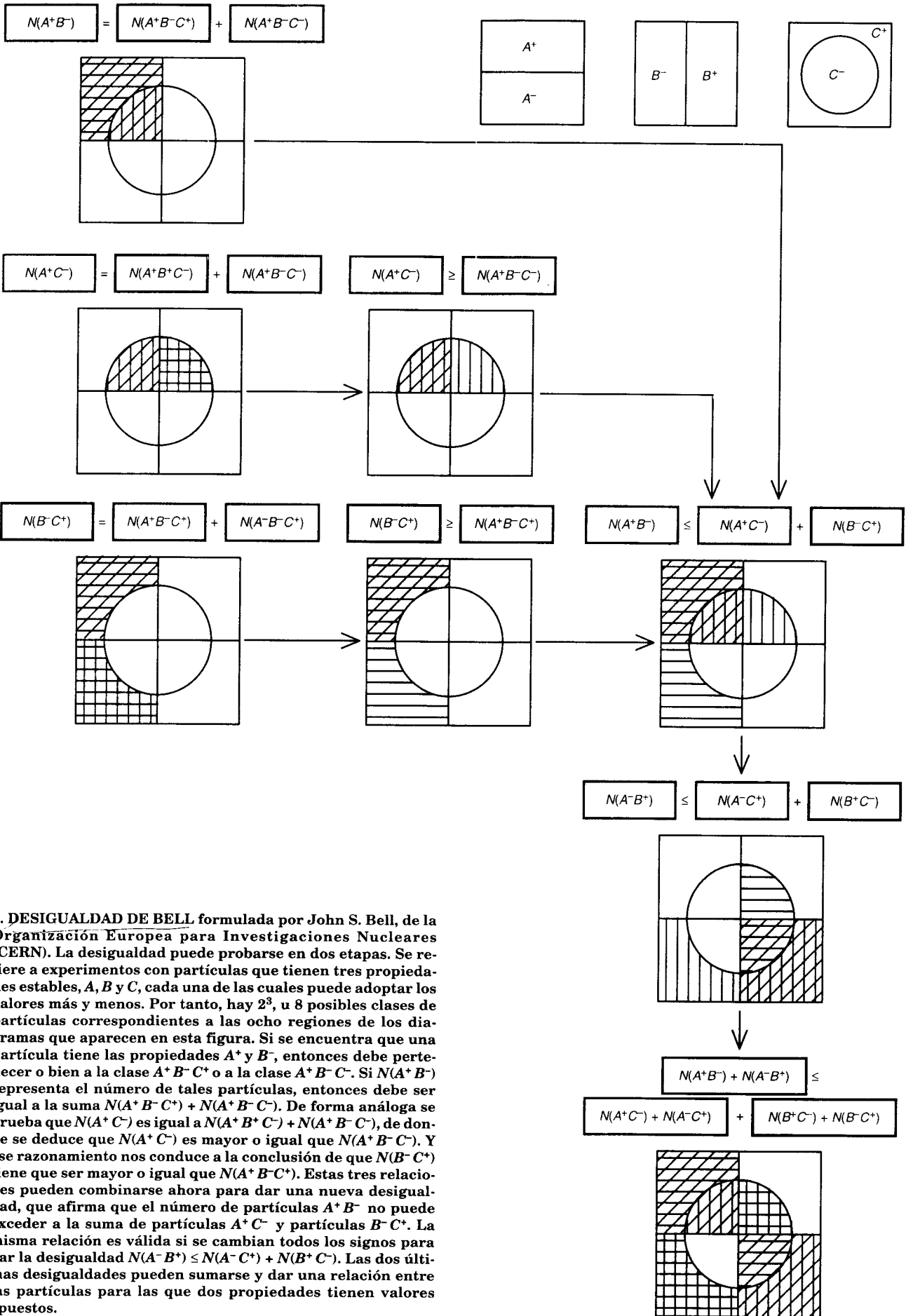
pero tales resultados se eliminarán, por no aportar nueva información. Los pares restantes constarán, entonces, de un protón en el que la medición se ha tomado a lo largo del eje  $A$  y otro en el que se ha hecho a lo largo del eje  $B$ , o de una medición según el eje  $A$  y otra según el  $C$ , o de otras en los ejes  $B$  y  $C$ . Para simplificar, denominaré los pares de cada una de estas tres muestras por  $AB$ ,  $AC$  y  $BC$ . Un par que al ser medido dé el resultado  $A^+$  para un protón y el  $B^+$  para el otro puede representarse por  $A^+ B^+$ . El número de pares observados de este tipo puede representarse por  $n[A^+ B^+]$ . ¿Cabe esperar relaciones entre estas cantidades?

Una de tales relaciones fue la descubierta en 1964 por John S. Bell, de la Organización Europea de Investigaciones Nucleares (CERN), al demostrar que, para cualquier gran muestra de pares de protones en estado singlete, las hipótesis de las teorías realistas locales imponían límites a la correlación que podía esperarse cuando se midieran distintas componentes del espín. El límite se expresa en forma de una desigualdad, que ahora se llama desigualdad de Bell. Establece que, en las condiciones experimentales antes mencionadas, el número de pares  $A^+ B^+$  no puede exceder a la suma del número de pares  $A^+ C^+$  y el número de pares  $B^+ C^+$ . La desigualdad puede simbolizarse mediante la expresión siguiente:

$$n[A^+ B^+] \leq n[A^+ C^+] + n[B^+ C^+]$$

Podríamos construir muchas desigualdades similares transponiendo los símbolos o cambiando los signos. Como las direcciones a lo largo de las cuales se definen las componentes del espín se eligieron de un modo arbitrario, todas estas formulaciones son intercambiables. Me detendré sólo en la anterior.

La desigualdad de Bell puede demostrarse en el contexto de las teorías realistas locales mediante un simple razonamiento de la teoría matemática de conjuntos. Es útil comenzar con una hipótesis contraria a los hechos: que exista alguna forma de medir independientemente dos componentes del espín de una partícula dada. Supongamos que este aparato inexistente hubiese revelado que un determinado protón tiene componentes de espín  $A^+$  y  $B^-$ . La tercera componente,  $C$ , no se ha medido, pero sólo puede tener dos valores: más o menos. Por tanto, el protón considerado debe ser un miembro de uno de los dos conjuntos de



**3. DESIGUALDAD DE BELL** formulada por John S. Bell, de la Organización Europea para Investigaciones Nucleares (CERN). La desigualdad puede probarse en dos etapas. Se refiere a experimentos con partículas que tienen tres propiedades estables,  $A$ ,  $B$  y  $C$ , cada una de las cuales puede adoptar los valores más y menos. Por tanto, hay  $2^3$ , u 8 posibles clases de partículas correspondientes a las ocho regiones de los diagramas que aparecen en esta figura. Si se encuentra que una partícula tiene las propiedades  $A^+$  y  $B^-$ , entonces debe pertenecer o bien a la clase  $A^+B^-C^+$  o a la clase  $A^+B^-C^-$ . Si  $N(A^+B^-)$  representa el número de tales partículas, entonces debe ser igual a la suma  $N(A^+B^-C^+) + N(A^+B^-C^-)$ . De forma análoga se prueba que  $N(A^+C^-)$  es igual a  $N(A^+B^+C^-) + N(A^+B^-C^-)$ , de donde se deduce que  $N(A^+C^-)$  es mayor o igual que  $N(A^+B^-C^-)$ . Y ese razonamiento nos conduce a la conclusión de que  $N(B^-C^+)$  tiene que ser mayor o igual que  $N(A^+B^-C^+)$ . Estas tres relaciones pueden combinarse ahora para dar una nueva desigualdad, que afirma que el número de partículas  $A^+B^-$  no puede exceder a la suma de partículas  $A^+C^-$  y partículas  $B^-C^+$ . La misma relación es válida si se cambian todos los signos para dar la desigualdad  $N(A^-B^+) \leq N(A^-C^+) + N(B^+C^-)$ . Las dos últimas desigualdades pueden sumarse y dar una relación entre las partículas para las que dos propiedades tienen valores opuestos.