

¿REPRESENTA LA TEORÍA CUÁNTICA UNA VISIÓN DEL MUNDO? -EN MEMORIA DE J.S.BELL-

Alicia Guerrero de Mesa (*)

Departamento de Física - Universidad Nacional - Bogotá

El primero de octubre de 1990 murió en Ginebra el físico irlandés John S. Bell. Desde su vinculación al equipo directivo del CERN, en 1960, se había dedicado al estudio de problemas actuales de la física de partículas. Sus trabajos sobre producción de bosones vectoriales intermedios (en colaboración con M. Veltman), sobre reacciones nucleares con neutrinos, interacciones débiles de los kaones y, en particular, el descubrimiento de las anomalías (con R. Jackiw) contribuyeron al desarrollo de la teoría cuántica de campos.

Pero un teorema publicado en 1964 en una revista de corta vida ¹ es la obra por la cual seguramente será recordado en el futuro, y no solo por los especialistas en física.

El **Teorema de Bell** fue la respuesta más contundente a un desafío planteado por Einstein en 1935 y reiterado por él hasta los últimos días de su existencia. Este descubrimiento teórico reabrió el debate sobre los fundamentos de la mecánica cuántica y desencadenó una avalancha de experimentos para poner a prueba la validez de algunas de las predicciones cuánticas más paradójicas.

EL CONCEPTO DE REALIDAD DE EINSTEIN

El célebre artículo de Einstein-Podolsky-Rosen² establece una contradicción entre cierto concepto generalmente aceptado de realidad y la afirmación de que la teoría cuántica, a pesar del carácter estadístico de sus predicciones, es una descripción completa de la realidad física.

Según la interpretación usual de la mecánica cuántica la descripción contenida en la función de onda o estado cuántico de un sistema es completa; pero, dado que no existen estados cuánticos correspondientes a posición y momentum bien definidos, una partícula no puede poseer simultáneamente estos atributos. Los autores aducen un ejemplo en que dos partículas quedan correlacionadas después de haber interactuado. Haciendo mediciones sobre una de ellas, sin interactuar directamente con la otra, se puede predecir con certeza el estado de esta. La paradoja reside en que se puede predecir o la posición o el momentum de la segunda partícula (una de las dos magnitudes incompatibles), sin afectarla localmente, dependiendo de lo que elija medir

el observador sobre la primera. Pero un criterio casi instintivo de realidad nos lleva a pensar que algo que se puede predecir con certeza debe ser real. Y como Einstein, el creador de la relatividad, no puede aceptar que esta realidad es creada instantáneamente por un acto de medición ejecutado en una región distante ocupada por la primera partícula, se ve forzado a concluir que la segunda posee efectivamente ambos atributos, aunque no sea posible medirlos simultáneamente. Esto es, existen elementos de la realidad que no pueden estar contenidos en la descripción cuántica.

Pero donde quizás aparece más nítida la concepción einsteniana de realidad y las razones de su inconformidad con la teoría cuántica es en la prolongada correspondencia con Max Born³, a través de la cual intentó infructuosamente hacerle comprender su punto de vista. Su problema central no es la corrección de la mecánica cuántica sino su interpretación física, tal como lo registra nítidamente la carta del 12 de enero de 1954:

"No era mi objetivo plantear objeciones contra la mecánica cuántica sino hacer una modesta contribución a la interpretación física de la teoría cuántica".

Y reitera la razón que lo induce a considerar incompleta la descripción cuántica:

"En la teoría cuántica se caracteriza el estado de un sistema mediante una función Ψ , que es una solución de la ecuación de Schrödinger. Toda solución se debe considerar como descripción de un estado físico posible del sistema. La cuestión es: ¿en qué sentido describe la función Ψ el estado del sistema? Mi afirmación es esta: La función Ψ no puede ser concebida como descripción completa sino incompleta del sistema. En otros términos: Hay propiedades del sistema individual, de cuya realidad nadie duda, que, sin embargo, no están contenidas en la descripción dada por la función Ψ ."

En carta de abril de 1948 Einstein plantea claramente la incompatibilidad de la interpretación usual de la mecánica cuántica con ciertos principios que él considera fundamentales para toda teoría física, a saber:

Primero: "los conceptos de la física se refieren a un mundo exterior real, es decir, son ideas de cosas (cuerpos, campos, etc.) que, se supone, tienen una 'existencia real', independiente del sujeto".

Segundo: "característico de estas cosas físicas es el ser pensadas como dispuestas en un continuo espacio-temporal".

Tercero: "resulta esencial que esta disposición de las cosas introducidas en la física sea tal que en un determinado tiempo estas cosas, en cuanto 'ocupan diferentes partes del espacio', tengan una existencia mutuamente independiente. (...) Es característica de la relativa independencia de cosas espacialmente separadas (A y B) la siguiente idea: Influencia exterior de A no tiene ningún efecto inmediato en B (...). Completa negación de este

principio haría imposible la idea de la existencia de sistemas (cuasi-) cerrados y, con ello, el establecimiento de leyes empíricamente comprobables, en el sentido corriente para nosotros.”.

Y concluye con una anotación que bien puede interpretarse como el desafío al cual dio respuesta 16 años más tarde el teorema de Bell:

“No me cabe duda de que los físicos que toman como definitiva en principio la descripción de la mecánica cuántica reaccionarán a estas reflexiones de la manera siguiente: Ellos renunciarán a la exigencia de que lo real-físico existente en distintas partes del espacio tenga una existencia independiente. Pueden argumentar que **la teoría cuántica en ninguna parte hace uso de esta exigencia**. Lo admito, pero cuando observo los fenómenos físicos que me son conocidos, especialmente aquellos que son exitosamente comprendidos por la mecánica cuántica, **no encuentro ningún hecho** que me haga parecer probable que se deba renunciar a esta exigencia.” (Subrayado por mí).

Obsérvese que entre los principios que Einstein considera fundamentales en toda teoría física no figura el **determinismo**. Aún si Dios jugara a los dados, quedaría abierta la posibilidad de una teoría estadística capaz de dar una descripción de lo real, ciertamente incompleta, pero la más completa posible. Tal parece ser la actitud dominante entre los físicos cuánticos. Einstein admite esto como una posibilidad lógica en carta del 3 de diciembre de 1953:

“Desde el punto de vista de esta concepción (estadística) la descripción del sistema individual es incompleta. Este hecho puede aceptarse tranquilamente si se supone que no existe una ley que rija plenamente el desarrollo temporal del sistema individual y que permita una descripción completa del mismo. En tal caso no se necesita recurrir a la interpretación de Bohr, según la cual no hay ninguna realidad independiente del sujeto que percibe. Yo no creo ciertamente que esta concepción (aunque consistente en sí misma) sea definitiva. Pero afirmo que es la única que se ajusta al mecanismo de la teoría cuántica probabilista.”

El testimonio de W. Pauli acerca de sus conversaciones con Einstein en Princeton, un año antes de su muerte, confirma que su preocupación central era la aparente falta de objetividad de la teoría cuántica, no su carácter indeterminista: “Me repitió expresamente que él no considera el concepto del ‘determinismo’ tan fundamental como ocurre a menudo y negó enérgicamente que él hubiese establecido alguna vez tal postulado (...) Igualmente niega que él use como ‘criterio para una teoría aceptable’ la pregunta: ‘¿Es estrictamente determinista?’. El punto de partida de Einstein es más bien ‘realista’, no ‘determinista’, es decir, su prejuicio filosófico es otro”.

Al final de esta carta Pauli hace una observación que resulta inobjetable, si se acepta como un postulado que la descripción cuántica del estado de un sistema es completa: "Uno no debe romperse la cabeza preguntándose si aquello sobre lo cual nada podemos saber existe, como tampoco sobre la antigua cuestión de cuántos ángeles caben en la punta de una aguja. Pero me parece que los problemas de Einstein son en última instancia siempre de este tipo." (Ibid.pp. 220-2).

EL TEOREMA DE BELL

El teorema de Bell forzó un viraje en el estilo de estos debates. Respondiendo al reto de Einstein, mostró que cualquier teoría o modelo que se ajuste a sus criterios de realidad conducirá necesariamente a predicciones experimentales en conflicto con la mecánica cuántica. Encontró, pues, una clase de hechos susceptibles de ser verificados experimentalmente, que podían poner a prueba la posibilidad de completar la teoría cuántica con modelos de "variables ocultas". De este modo, al confirmarse las predicciones cuánticas, se revelarían inútiles los esfuerzos por construir una imagen einsteniana de la realidad, que fuese al mismo tiempo objetiva, causal y acorde con las predicciones verificables de la teoría cuántica.

Bell parte de un modelo construido por D. Bohm y Y. Aharonov para ilustrar la paradoja de Einstein-Podolsky-Rosen⁴. En esencia se trata de un par electrón-positrón que se crea en algún proceso con espín total cero y se separa en direcciones opuestas.

Medición del espín de una de las dos partículas en cualquier dirección dará como resultado (+1) ó (-1). Una medición realizada después sobre la segunda partícula a lo largo de la misma dirección dará con certeza un resultado opuesto ya que, por hipótesis, el espín total del sistema formado por el par es nulo.

Por otra parte, mediciones de espín a lo largo de diferentes direcciones son incompatibles. De manera que, sin actuar directamente sobre la segunda partícula, se puede predecir su espín en una u otra dirección, (no en ambas simultáneamente), según lo que se mida sobre la primera.

Si se aplica a esta situación el principio de localidad de Einstein, según el cual ninguna influencia puede propagarse instantáneamente, entonces es natural asumir que el valor de estas variables (incompatibles, según la mecánica cuántica) está predeterminado, existe antes de la medición. Pero esto implica que la función de onda da una descripción incompleta de la realidad. Y la consecuencia obvia será la búsqueda de variables adicionales que 'completen' la descripción cuántica, tal como intentó hacer Bohm en un primer modelo no-local en 1952.

Bell demuestra simplemente que todo intento de 'completar' la teoría cuántica con variables adicionales es incompatible con las predicciones estadísticas de aquella, a menos que se acepten "fantasmagóricas acciones a distancia". Se plantea pues una disyuntiva entre realismo y causalidad relativista, disyuntiva entre dos principios igualmente caros para Einstein. Pero Bell logra presentar los hechos que reclamaba Einstein, hechos que se pueden producir experimentalmente y que muestran la **incompatibilidad de una cierta visión de la realidad física con predicciones específicas, cuantitativas, de la teoría cuántica.**

El modelo de Bohm-Aharonov no ha sido sometido a prueba experimental directa debido a dificultades técnicas. Pero en una serie de experimentos que culminaron con los resultados publicados en 1982 por el grupo de A. Aspect y colaboradores⁵ se examinó un sistema que presenta correlaciones en esencia de idéntico carácter. Se trata de un par de fotones emitidos por un átomo de calcio excitado con un láser de frecuencia adecuada, que decae en cascada al estado base. La teoría cuántica predice que el par de fotones emitidos tienen espín total cero. Se dice entonces que el sistema está en un estado singlete de polarización. Si se mide la polarización de uno de los fotones emitidos con ayuda de un filtro de polarización orientado en cierta dirección, se puede decir con certeza que el otro fotón, identificado mediante técnicas de coincidencia, queda con polarización opuesta a lo largo de esta misma dirección. Si se miden las polarizaciones de los dos fotones en estado singlete con polarizadores orientados en direcciones 1 y 2 que forman entre sí un ángulo α , la teoría cuántica predice las siguientes probabilidades:

Ambos fotones polarizados positivamente a lo largo de los ejes respectivos :
 $P_{++} = 1/2 (\text{sen}^2 \alpha)$.

Pares de fotones con polarizaciones + y - a lo largo de los respectivos ejes :
 $P_{+-} = 1/2 (\text{cos}^2 \alpha)$.

UNA VERSION MAS TRANSPARENTE

En un artículo publicado en 1985 bajo el sugestivo título (inspirado en una pregunta de Einstein): "¿Está ahí la luna cuando nadie la mira?"⁶, David Mermin presentó una versión del teorema de Bell, plena de color, plasticidad y "magia cuántica", y, sin embargo, de una transparencia conceptual que llevó a Martin Gardner a exclamar: "Por primera vez he comprendido a qué se refiere el teorema de Bell".⁷

El 'experimento mental' propuesto por Mermin hace uso de un aparato que consta de tres piezas: Dos de ellas actúan como detectores (A y B) separados por una distancia de más de diez metros (como en el experimento real de

Aspect y colaboradores). En el punto medio entre los dos detectores está la fuente que emite pares de partículas que son registradas por los detectores. Cada uno de estos está provisto de un mecanismo que permite elegir entre tres direcciones. Cuando una partícula llega a un detector este responde con dos alternativas que podemos codificar como sí o no, + ó -, rojo o verde (codificación elegida por Mermin). Se supone rigurosamente prohibido cualquier intercambio de información entre los detectores. Las reglas del juego son las siguientes:

i) Si las orientaciones de los dos detectores coinciden y un detector responde **sí** el otro debe responder necesariamente **no**, es decir, debe haber siempre desacuerdo.

ii) Si las direcciones de los detectores se eligen de modo independiente y completamente al azar (por ejemplo seleccionando cada vez una de tres cartas bien barajadas), entonces en un número suficientemente grande de mediciones habrá en promedio igual número de acuerdos y desacuerdos.

La primera regla exige que exista una correlación perfecta entre las partículas cuando las orientaciones de los dos detectores son paralelas (en cualquiera de las tres direcciones posibles). Como por hipótesis no es posible que haya intercambio de información entre las partículas en el intervalo de tiempo entre la detección de ambas, la manera más simple de satisfacer esta exigencia es suponer que las partículas abandonan la fuente con un conjunto de instrucciones que especifican cómo debe responder cada detector en cualquiera de las tres orientaciones. Es decir, vamos a suponer, conforme con el criterio de Einstein, que los valores que medimos están predeterminados, son pre-existentes.

En total existirán 8 posibles instrucciones:

Direcciones:	Detector A			Detector B		
	1	2	3	1	2	3
	+	+	+	-	-	-
	+	+	-	-	-	+
	+	-	+	-	+	-
	+	-	-	-	+	+
	-	+	+	+	-	-
	-	+	-	+	-	+
	-	-	+	+	+	-
	-	-	-	+	+	+

y 9 posibles combinaciones de ejes: (11, 12, 13, 21, 22, 23, 31, 32, 33). Con este conjunto de instrucciones posibles podemos calcular las probabilidades de obtener acuerdos y desacuerdos suponiendo que las tres direcciones son igualmente probables para cada detector:

-Si la partícula que llega al detector A tiene instrucciones (+,+,+) la combinación de cada una de las direcciones de A con cada una de las de B nos dará en total 9 desacuerdos y ningún acuerdo. Lo mismo ocurre si tiene instrucciones (-,-,-), pues esto es lo que garantiza la correlación perfecta (lo que equivale en el experimento de Aspect a espín total igual a cero).

-Si la partícula en A tiene instrucciones (+,+,-) obtenemos un total de 5 desacuerdos y 4 acuerdos. El mismo resultado se obtiene para las restantes instrucciones posibles (que tienen el rasgo común de tener solo dos instrucciones del mismo signo).

Es decir, para todas las instrucciones posibles el número de acuerdos será inferior al número de desacuerdos. No importa qué probabilidad asignemos a cada instrucción habrá siempre mayor probabilidad de desacuerdos. No será posible obtener en promedio igual número de acuerdos y desacuerdos, lo que muestra que las reglas del juego son incompatibles con la existencia de prescripciones!

En su carta de comentario Gardner sugiere un juego de salón similar a este "experimento": Dos personas frente a dos paredes opuestas tienen ante sí una rueda que gira y se detiene al azar en posiciones 1,2 ó 3. Ellos no pueden comunicarse entre sí pero reciben en cada juego una tarjeta con instrucciones como las indicadas en la tabla. Un signo más (+) en el sitio correspondiente a la orientación 1 significa que si la rueda se detiene en la posición 1 el jugador correspondiente debe levantar la mano derecha. Un signo menos (-) significa que debe levantar la izquierda. Las reglas del juego son las siguientes:

-Cuando los números de las ruedas coincidan uno levantará la mano izquierda y el otro la derecha.

-Cuando los números no coinciden es posible que ambos levanten la misma mano o estén en desacuerdo.

-En un número suficiente de ensayos las manos levantadas coincidirán la mitad de las veces y estarán en desacuerdo la otra mitad.

¿Qué plan de distribución de tarjetas puede satisfacer estas tres reglas?

(Gardner piensa que este puede ser un pasatiempo divertido, pero Mermin le advierte que con juegos como este va a ser difícil que alguien acepte una invitación a sus tertulias).

Pues bien: Las reglas del juego han sido construidas sobre la base de las predicciones cuánticas que se pueden calcular fácilmente:

-Si el detector A registra un resultado (+) a lo largo de la dirección 1 la probabilidad de obtener acuerdos con el detector B en cualquiera de las tres orientaciones igualmente probables será igual a:

$$\begin{aligned} 1/3 (P_{1+,1+} + P_{1+,2+} + P_{1+,3+}) &= 1/3 (\text{sen}^2 0 + \text{sen}^2 120 + \text{sen}^2 240) \\ &= 1/3 (0 + 3/4 + 3/4) = 1/2. \end{aligned}$$

La probabilidad de obtener desacuerdos (es decir un resultado negativo en cualquiera de las tres direcciones del detector B) es igual a:

$$\begin{aligned} 1/3 (P_{1+,1-} + P_{1+,2-} + P_{1+,3-}) &= 1/3 (\cos^2 0 + \cos^2 120 + \cos^2 240) \\ &= 1/3 (1 + 1/4 + 1/4) = 1/2. \end{aligned}$$

-Si el detector A registra un resultado (-) se obtendrá probabilidad 1/2 de obtener acuerdo y 1/2 de obtener desacuerdo. Por la simetría del arreglo experimental iguales probabilidades de acuerdos y desacuerdos se obtendrán en caso de que el detector A esté orientado a lo largo de direcciones 2 o 3 y registre un resultado (+) o (-), como puede verificarse fácilmente.

Y, como era de esperar, los fotones en el experimento de Aspect y colaboradores jugaron el juego con base en las reglas de la mecánica cuántica⁶. Debemos reconocer, sin embargo, que los partidarios irreductibles de las prescripciones o "variables ocultas" tienen una coartada impecable: si se toma en cuenta la eficiencia limitada de los detectores y se introduce en las tarjetas de instrucciones una alternativa que indique posibilidad de que una partícula no sea detectada, es posible construir modelos deterministas o estocásticos que se aproximen arbitrariamente a los resultados efectivamente obtenidos. Por esta razón Mermin reconoce que los experimentos realizados no excluyen de una vez y para siempre la posibilidad lógica de una descripción "local y realista de las correlaciones". Pero es difícil aceptar que los errores experimentales conspiran para producir los resultados predichos por la mecánica cuántica.

Debemos pues reconocer que los pares de fotones emitidos en cascada por átomos excitados de calcio satisfacen las reglas de juego. Pero si estas reglas son incompatibles con la suposición de respuestas predeterminadas y si se garantiza (como en efecto se hizo) que ninguna señal puede viajar de un detector a otro para comunicar el primer resultado antes de la segunda medición, entonces es forzoso concluir que los fotones no llevan consigo "instrucciones", esto es, que sus polarizaciones a lo largo de las direcciones 1,2 y 3 no están predeterminadas, que un cierto estado de polarización de ambas partículas se "crea" instantáneamente en el momento de la primera detección, merced a la llamada "reducción del paquete de ondas", impuesta como un postulado interpretativo por la teoría cuántica(a pesar de que en apariencia viola un principio de la relatividad especial). Cualquier intento de completar la teoría con modelos de variables ocultas tendría que aceptar la posibilidad de que la información viaje de una región a otra con una velocidad mayor que la de la luz. ¡Pero pocos físicos parecen dispuestos a pagar este precio para explicar el misterio!

VISION DEL MUNDO Y MECANICA CUANTICA

Un profesor de Princeton decía, según testimonio de Mermin : " Alguien que no sea perturbado por el teorema de Bell tiene que tener piedras en la cabeza". Y Richard Feynman, en ocasiones tan alérgico a los filósofos, reconocía sin embargo que el problema de interpretación de la teoría cuántica lo ponía nervioso. -"Siempre hemos tenido gran dificultad en comprender **la visión del mundo que la mecánica cuántica representa**"- escribía en 1982⁹.

Pero, ¿puede la teoría cuántica representar una visión del mundo? ¿O es apenas, como se lamentaba Einstein, "una maquinaria que permite hacer profecías pero a la cual no logramos dar un sentido claro"?. ¿Es, como escribía J.S. Bell, una teoría fundamentalmente acerca de "observables", de resultados de mediciones y no de "beables", conceptos capaces de ser objetivados como representaciones de una realidad independiente del sujeto, susceptibles de dar una imagen objetiva del mundo?.

O quizás tiene razón Pauli al decir que uno no debe romperse la cabeza preguntándose si aquello sobre lo cual nada podemos saber existe o no. En otros términos: Así como los teólogos medioevales no podían asignar de manera consistente propiedades espacio-temporales a los ángeles para responder a la pregunta de cuántos podían caber en la punta de una aguja, no parece tener sentido interpolar entre dos mediciones un submundo conformado según las mismas categorías y regido por las mismas leyes que rigen los fenómenos observables. Este mundo subcuántico o de los "interfenómenos", como lo denominó Hans Reichenbach, estaría, por principio, más allá de nuestros conceptos cotidianos de causalidad, individualidad, localización espacio-temporal, transmisión de señales, etc.

Admitir que a este nivel fundamental de la realidad no podemos acceder con categorías forjadas en la experiencia clásica, sino con formas matemáticas que quizás representan "potencialidades", más bien que realidades en el sentido corriente, no conduce inevitablemente a una posición irracionalista. Pero es obvio que si en el concepto de "visión del mundo" incorporamos elementos intuitivos incompatibles con el nivel cuántico de la realidad, debemos reconocer que, en este sentido, la física cuántica no está en condiciones de representar una visión del mundo.

Por otra parte, es necesario explicar por qué al nivel de la experiencia clásica podemos, sin incurrir en contradicciones o paradojas, asignar propiedades objetivas a las cosas, decir que la luna, constituida por entes cuánticos, sigue allí aunque ningún observador humano la esté mirando.

Referencias:

- 1 J. S. Bell, "On the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox", *Physics*, **1**, 195 (1964).
- 2 A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen, "Can the Quantum Mechanical Description of Reality be Considered Complete ?", *Phys.Rev.***47**, 777 (1935).
- 3 Albert Einstein-Max Born-Briefwechsel (1916-1955), Rowohlt, Hamburg (1972).
- 4 D. Bohm y Y. Aharonov, *Phys. Rev.* **108**, 1070 (1957).
- 5 A. Aspect, P. Grangier, G. Roger, *Phys. Rev. Lett.* **47**, 460(1981) y **49**, 91(1982); A. Aspect, J. Dalibard, G. Roger, *Phys. Rev. Lett.* **49**, 1804(1982). Estos experimentos del grupo de Orsay en Francia fueron precedidos por otros realizados con fotones opticos por Clauser y Freedman en Berkeley, Holt y Pipkin en Harvard y R. Thompson en Texas.
- 6 N. David Mermin, *Phys.To./abril* 1985
- 7 *Phys.To./nov.* 1985 (sección Letters)
- 8 Ciertamente en una versión modificada del teorema de Bell, donde los angulos de mayor interes fueron múltiplos de 22.5° , pero conceptualmente idéntica a la descrite por Mermin.
- 9 F. P. Feynman, *Int. J.Theor.Phys.* **21**, 471(1982).

(*) Profesora Asociada del Departamento de Física de la Universidad Nacional de Colombia.