

Misterios de la mecánica cuántica: el Nobel de Física 2022

CABEZA: Misterios de la mecánica cuántica: el Nobel de Física 2022
CRÉDITO: François Leyvraz

El doctor François Leyvraz hizo su doctorado en Zürich, Suiza. En 1987 se unió a lo que ahora es el Instituto de Ciencias Físicas en Cuernavaca, donde ha seguido laborando hasta el presente. Ha trabajado en varios temas, entre otros el estudio de sistemas cuánticos en el límite en que su comportamiento se vuelve más y más similar al clásico. Es miembro de la Academia de Ciencias de Morelos.

Esta publicación fue revisada por el comité editorial de la Academia de Ciencias de Morelos.

Octubre, mes de los premios Nobel

Mucho se ha hablado de los misterios de la mecánica cuántica, pero pocas veces se aclara de qué se trata. Quiero aprovechar que los premios Nobel de Física se otorgaron este año a tres gigantes de la Física, cuya merecida fama descansa en haber mostrado, con magistrales experimentos, lo extraña que es esta rama de la Ciencia.

abajo. El problema no es que no sepamos calcular las consecuencias de la mecánica cuántica. Más bien, es que, habiéndolas calculado, estamos perplejos ante el posible sentido del resultado.

La propiedad de los sistemas cuánticos en la que me quiero fijar es su *sensitividad*. Ésta se manifiesta en la imposibilidad de observar un sistema sin afectarlo. ¿Cómo entender esto? Una metáfora de la vida diaria puede ayudar. Al caminar aparentemente solos, en ocasiones sentimos que alguien nos mira, y al voltear la vista, vemos que efectivamente es así. Alguna señal nos indica que estamos siendo observados, sentimos algo como el peso de una mirada.

Resulta que un sistema cuántico es tan sensible que cualquier mirada lo golpea de manera incontrolable. Sólo podemos calcular con certeza lo que hace un sistema cuántico *mientras no lo observamos*. Pero entonces ¿cómo confirmamos lo que dice la teoría? Resulta que sí existe un modo de observar que funciona, pero con fuertes limitaciones. Lo que podemos hacer es una—y una sola—pregunta al sistema. El sistema entonces da una *respuesta*. La teoría predice las probabilidades con las que el sistema dará cualquiera de las posibles respuestas. Pero cada respuesta es definitiva: si al recibir la respuesta repetimos la misma

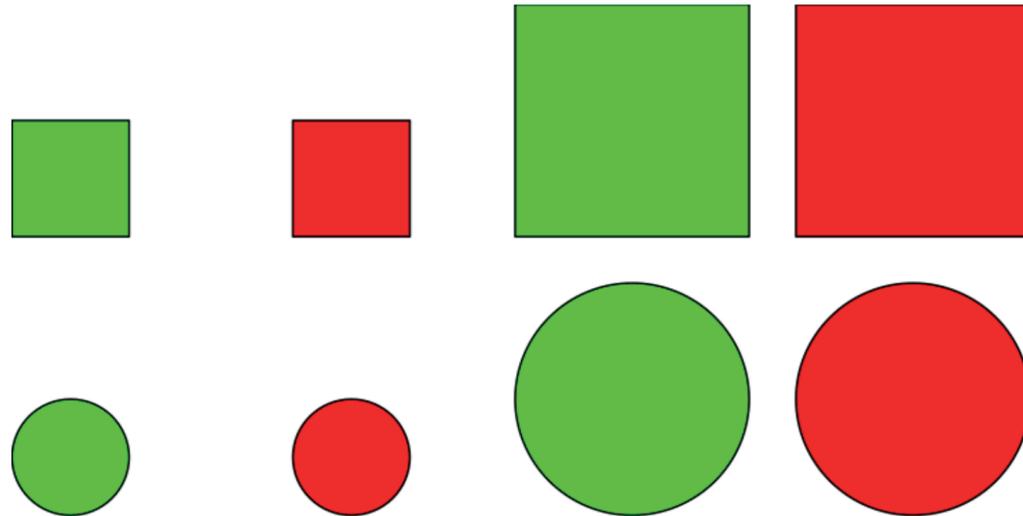


FIGURA 1. LAS partículas tienen una forma, un color y un tamaño. Cada atributo puede tomar uno de dos valores.

Esto lleva a la duda: ¿será realmente imposible atribuir una posición y una velocidad a la misma partícula? Siguiendo una sugerencia inicial de Einstein, Podolsky y Rosen, el físico irlandés John Stewart Bell logró proponer un experi-

den preparar las cosas de tal manera que, para cualquier pareja de propiedades, la probabilidad de observar una o su contrario sea de exactamente 1/2. Se muestran las varias posibilidades para cada partícula en la Figura 1.

Lo que Einstein y sus colaboradores mostraron es que es posible arreglar las cosas de tal manera que, sean cual fuere las propiedades elegidas, al observar la misma en ambas partículas, el resultado siempre coincide: si, por ejemplo, observamos el tamaño de ambas partículas, y una es grande, la otra también, si una es chica, la otra también, y de manera similar para la forma, obtenemos dos cuadrados o dos círculos, y para el color, o dos verdes o dos rojos. Entonces, si por ejemplo, observamos el tamaño de una partícula y la forma de la otra, y obtenemos, digamos, que la partícula 1 es cuadrada y la 2 grande, aparentemente podríamos afirmar que ambas partículas son cuadradas y ambas son grandes, sin necesidad de haber observado ni el tamaño de la partícula 1 ni la forma de la 2.

Esto sigue de la observación que, si *hubiéramos* observado el tamaño de la partícula 1, habríamos forzosamente de obtener el resultado *grande*, ya que es el tamaño observado para la partícula 2 y al medir la misma propiedad a ambas partículas siempre obtenemos coincidencias, en este caso, el mismo tamaño. Similarmente, obtendríamos que la partícula 2 es cuadrada, ya que esto hubiera forzosamente resultado así si hubiéramos medido la forma de la partícula 2 en lugar de su tamaño.

Podríamos dudar si la observación de la forma de la partícula 1 podría afectar al sistema de manera tan impredecible que la observación de la forma de la partícula 2 quedara en entredicho. La sugerencia de Einstein para evitar esto es sencilla: se alejan ambas partículas antes de realizar cualquier observación. Estando éstas lo suficientemente alejadas y realizando ambas observaciones simultáneamente, sería imposible que una de las dos observaciones afecte a la otra, ya que ningún efecto puede propagarse instantáneamente.

bable que la partícula 2 sea grande a que sea pequeña, y a que sea verde de manera simétrica. Esta situación se puede resumir como sigue: dividamos las respuestas posibles en dos grupos (cuadrada, rojo, grande) y (circular, verde, pequeño). Si la partícula 1 tiene una propiedad del grupo 1, la partícula 2 tendrá una propiedad del grupo 2 con probabilidad tres veces mayor que del mismo grupo 1. Y viceversa si la partícula 1 tiene una propiedad del grupo 2. Las tablas de probabilidades se muestran en la Figura 2.

Ahora se puede mostrar, y esto es absolutamente elemental, aunque algo enredado, que es sencillamente imposible asignar *pares de propiedades* consistentes con estas probabilidades. Supongamos que tengamos 800 mediciones para la pareja de observables forma y tamaño. Entonces, en promedio, vemos que las parejas (cuadrada, pequeño) y (circular, grande) se observan 300 veces cada una, mientras las otras parejas (cuadrada, grande) y (circular, pequeño) se observan 100 veces (es decir, tres veces menos, como se dijo arriba). Similarmente, si observamos forma y color, tenemos 300 observaciones de (cuadrada, verde) y (circular, rojo), y 100 observaciones de las otras. Y finalmente hay 300 observaciones de (rojo, pequeño) y (verde, grande) comparado con 100 de (rojo, grande) y (verde, pequeño).

El problema que aparece ahora es sencillo, pero entenderlo requiere de *toda su atención*: si interpretamos a la observación de la pareja (circular, pequeño), por ejemplo, significa que *ambas* partículas son circulares y pequeñas, entonces vemos que éstas ocurren con probabilidad 1/8. Pero si realmente queremos atribuir estas propiedades a las partículas, debemos poder hablar de partículas con tres propiedades dadas, por ejemplo (cuadrada, verde, grande). Ahora, entre 800 partículas, hay menos de 100 partículas del tipo (cuadrada, verde, grande), ya que éstas son del tipo (cuadrada, grande), de los que sólo hay 100. Pero la suma de (cuadrada, verde, grande) con (cuadrada, verde, pequeño) es de 300, porque corresponde a las

partículas de tipo (cuadrada, verde). Por ello, debe haber más de 200 del tipo (cuadrada, verde, pequeño). Por otro lado, estas partículas son del tipo (verde, pequeño) de las que sólo puede haber 100. Por lo mismo no podemos dar valores consistentes para el número de partículas (cuadrada, verde, pequeño), ya que debe ser tanto ¡mayor que 200 como menor que 100!

La contradicción, por cierto, depende de los detalles del ejemplo. En mecánica cuántica podemos llegar a una situación donde algunas parejas son tres veces más probables que las otras. Esto es esencial. Si, en su lugar, sólo hubiera un factor de dos, no habría problema alguno. Sin embargo, la posibilidad de realizar un factor de tres se desprende de un cálculo elemental de cuántica, que no deja la menor duda.

En resumen: si podemos realizar un experimento en que dos partículas se envían a dos lugares muy separados, y luego se realiza sobre la partícula 1 una observación arbitraria (de tamaño, forma o color) y sobre la partícula 2 otra observación de las mismas propiedades, las frecuencias con las que aparecen los varios pares de respuestas no se pueden explicar en términos de propiedades que tienen las partículas *de manera individual*.

¿Y qué? Hemos discutido una paradoja que tal vez parezca un juego bobo, al nivel de un crucigrama. ¿Por qué ha creado tanta controversia? Hay dos versiones acerca de lo que pasa en una observación de un sistema cuántico. La opinión tradicional decía que el acto de observar cambia al sistema, y que por ello no se puede decir que el acto de observar consta en averiguar una propiedad real del objeto. Más bien, es algo que el mismo proceso de observación crea. El comportamiento de un sistema cuántico sería entonces como el de un perrito: al hacerle caso, se comporta de una manera diferente de lo normal, y el comportamiento observado es un efecto conjunto de la observación y de lo observado.

La otra opinión es la común y corriente: las partículas tienen propiedades que existen, aunque no se han observado. Esta opinión no tenía mucho apoyo, porque la mecánica cuántica no da ninguna idea de lo

que estas propiedades pudieran ser, pero su atractivo intuitivo no se niega.

La primera observación, debida a EPR, va en contra de la opinión tradicional y a favor del sentido común: si el par de partículas que considero está, la una en la Tierra y la otra en la Luna, y si mido, digamos, la forma de la partícula terrenal y me da “cuadrada”, sé que la partícula lunar siempre dará cuadrada. Esto parece indicar con mucha fuerza que la forma de la partícula lunar no fue creada por el efecto de una medición en la Tierra. Esta seguridad nos viene de una creencia muy, pero muy, arraigada entre físicos, que ningún efecto se puede propagar más rápido que la luz.

Pero la observación de Bell destruye esta ilusión bienhechora. Si las propiedades existen y son de las partículas, sin depender del proceso de observación, entonces podríamos argumentar como se ha descrito arriba, y llegar a un absurdo: los datos conocidos acerca de las frecuencias de las propiedades tomadas por pares (cuadrada, rojo) o (verde, chica) no pueden extenderse a listas de tres propiedades.

Ahora ¿qué sucede? La mayoría prefiere no pensar demasiado en ello, pero los que sí lo hacen han desarrollado varias ideas, cada cuál más curiosa que la otra. Para dar una idea de las locuras que se manejan, la solución que muchos consideran como la más “sencilla” y “realista” corresponde a una versión sería del “multiverso” de la ciencia ficción. (Y si ésta es la realista, ¿cuáles serán las otras? Una es que el futuro puede afectar el presente. Otra, que nuestro Universo es totalmente determinado, y que por ende no podemos elegir libremente lo que vamos a observar. Y hay muchas más. . .)

Los galardonados
La pregunta que se impone entonces es: todo esto, ¿es cierto? Al fin de cuentas, los físicos a veces nos equivocamos.

El artículo de Bell pronto dio lugar a varios intentos de verificación experimental. Esto no es sencillo. Primero, hay que producir los pares de partículas en los estados del tipo EPR. Para partículas se escogen fotones, partículas que son como “átomos de luz”. Las propiedades (tamaño, color y forma) en realidad corresponden a algo llamado polarización: la luz tiene una dirección característica, perpendicular a la dirección en que se propaga. Las

lentes Polaroid aprovechan esto, por ejemplo, y dejan pasar toda la luz cuya dirección es paralela a la dirección del polarizador, y absorbe el resto.

Resulta que, a nivel de los fotones, pasar o no pasar a través de un polarizador corresponde a dos resultados opuestos para su polarización y medir polarizaciones en direcciones distintas (no perpendiculares) es equivalente a medir propiedades distintas, en analogía a forma, color y tamaño. Preguntarnos si nuestra partícula tiene tal forma, color y tamaño es como preguntarnos si un fotón tiene la propiedad de poder atravesar o no cada uno de tres polarizadores dados, aunque no podamos medir más que una cualquiera de esas propiedades.

Ahora queda por alejar los fotones lo suficiente (sin que se pierdan). Una vez alejados toca definir instantáneamente e independientemente de cada lado cuál propiedad se va a medir, i.e., en qué dirección se orientará el polarizador correspondiente, y finalmente recoger los datos y mostrar que las extrañas predicciones de John Stewart Bell sí se cumplen, que es falso que cada partícula tenga valores predefinidos para sus tres atributos y que la distancia no destruye su *entrelazamiento* con su pareja.

Después de muchas décadas, entre los tres galardonados se lograron una serie impresionante de experimentos que han despejado todas las dudas al respecto: la Naturaleza de verdad es tan extraña como nos lo decía Bell.

Estos logros fueron de los tres, pero antes de todo de Aspect y de Clauser. ¿Qué haría entonces Zeilinger? Su contribución fue sentar las bases de una tecnología basada en estos efectos: ya que el mundo es mágico, hagamos varitas mágicas con base en el *entrelazamiento* (este es el nombre de la propiedad característica de los estados EPR). Esto nos lleva al mundo de la información cuántica y de las posibles computadoras cuánticas. Hay mucho aún por descubrir.

Lecturas recomendadas
Entrelazados, Luis Mochán <https://acmor.org/publicaciones/entrelazados>
Conversación sobre mecánica cuántica con un amigo, François Alain Leyvraz <https://acmor.org/articulos-anteriores/conversacion-sobre-mec-nica-cu-ntica-con-un-amigo>

Esta columna se prepara y edita semana con semana, en conjunto con investigadores morelenses convencidos del valor del conocimiento científico para el desarrollo social y económico de Morelos. Desde la Academia de Ciencias de Morelos externamos nuestra preocupación por el vacío que genera la extinción de la Secretaría de Innovación, Ciencia y Tecnología dentro del ecosistema de innovación estatal que se debilita sin la participación del Gobierno del Estado.

The 2022 physics laureates

Interview with Alain Aspect

“The conclusion is, yes, quantum mechanics resists all possible attacks!”

Alain Aspect was trying to find the limit of quantum mechanics, but, as he says in this call with Adam Smith, “I didn’t find it!”.



Interview with John Clauser

“What a waste of time, now start doing some real physics!”

As a young man, John Clauser set out to topple quantum mechanics, but all his faculty thought he was crazy.



Interview with Anton Zeilinger

“It’s probably one of the most beautiful theories ever invented”

Anton Zeilinger conveys his love for the elegant simplicity of quantum mechanics in this call recorded shortly after the public announcement of his Nobel Prize.



<https://www.nobelprize.org>

Vale la pena empezar enfatizando que la mecánica cuántica no se origina en las paradojas que queremos discutir. Explica exitosamente el mundo de lo pequeño: los átomos, las moléculas, la luz emitida por átomos aislados y mucho más. Productos de esta teoría son, por ejemplo, el láser, los transistores (usados en los circuitos integrados de nuestras computadoras) y los discos compactos. No deja nada a la fantasía: lo que predice se ha verificado, incluyendo las aparentes situaciones extrañas que vamos a discutir

pregunta, obtenemos de nuevo la misma respuesta, con certeza. El problema esencial es que no podemos realizar otra pregunta: el sistema resulta tan trastornado por la observación que, tras el primer interrogatorio, ninguna respuesta a otra pregunta diferente a la primera es de fiar. Ejemplos de preguntas que no se pueden combinar son: ¿dónde estás? y ¿qué tan rápido vas? o ¿hacia dónde miras? y ¿qué tan rápido giras?

El argumento de Einstein, Podolsky y Rosen (EPR)

mento que llevaba, según todas las reglas del juego, a una situación difícil de entender. Pongamos el asunto en escena: el sistema cuántico consta de dos partículas, y nos proponemos interrogar a cada una de éstas sobre tres propiedades distintas. Para evitar introducir jerga, les daremos nombres sencillos a las tres propiedades y a los posibles resultados de las observaciones. Una partícula puede tener una *forma* dada, que puede ser o cuadrada o circular, un *color* dado, que puede ser o rojo o verde, y un *tamaño* dado, que puede ser o grande o pequeño. Se pue-

	rojo	grande	rojo	grande
rojo	1	3	1	3
verde	3	1	3	1
	cuadrado	circular	grande	grande

FIGURA 2. TABLAS de probabilidades relativas para atributos de una partícula (renglones) dados los atributos de la otra (columnas).