

## El teorema de Kochen-Specker llega al laboratorio

Cincuenta años después de que John Bell formulase sus célebres desigualdades, la demostración empírica de un teorema complementario restringe aún más la posibilidad de interpretar los fenómenos cuánticos en términos de variables ocultas

ADÁN CABELLO

La teoría cuántica probablemente sea la construcción científica más exitosa de todos los tiempos. No solo todas sus predicciones han sido verificadas en el laboratorio con un detalle sin precedentes, sino que posee una sencillez y una austeridad matemática increíbles. Pero, sobre todo, la física cuántica ha cambiado nuestra forma de entender el universo. Por ejemplo, ha desterrado la idea de que los resultados de los experimentos estén predeterminados.

Al contrario de lo que sugiere nuestra intuición clásica, la teoría cuántica establece que un sistema físico no posee propiedades bien definidas hasta que estas no se miden. En 1967, Simon Kochen, entonces en Cornell y ahora en la Universidad de Princeton, y el ya fallecido Ernst Specker, por entonces en el Instituto Politécnico de Zúrich, demostraron matemáticamente hasta qué punto esa intuición clásica resultaba incompatible con las predicciones de la teoría cuántica. Sin embargo, y a pesar del tiempo transcurrido, la primera verificación empírica de su teorema solo pudo llevarse a cabo hace poco. Una vez más, los resultados empíricos han confirmado las predicciones de la teoría cuántica y han puesto de manifiesto la dificultad para interpretarla en términos de variables ocultas (variables deterministas, o «clásicas»).

### Contextos cuánticos

Hace ahora 50 años, John Bell demostró que ninguna teoría de variables ocultas locales podía reproducir las predicciones cuánticas relativas a estados entrelazados; es decir, estados de al menos dos partículas preparadas de antemano de cierta manera. El teorema de Kochen-Specker complementa el resultado de Bell, ya que demuestra que la imposibilidad de reproducir las predicciones cuánticas mediante variables ocultas no se circunscribe a sistemas entrelazados, sino que ocurre

también en sistemas individuales y con independencia de cómo preparemos el estado cuántico.

La hipótesis que Kochen y Specker demostraron incompatible con las predicciones cuánticas es que el resultado de un experimento esté predeterminado y sea independiente de qué otros experimentos se hagan simultáneamente. Esta hipótesis recibe el nombre de «no contextualidad». Un «contexto» denota un conjunto de experimentos cuyos resultados tienen probabilidades bien definidas con independencia de en qué orden se hagan.

Kochen y Specker observaron que existen conjuntos de experimentos elementales, con posibles resultados 1 y 0 (que representan, respectivamente, las respuestas «sí» y «no» a la pregunta formulada en el experimento), a los que, con independencia del estado en que esté preparado el sistema físico, es imposible asignar un resultado (1 o 0) de manera que se cumplan dos reglas básicas:

- (i) Los resultados de dos experimentos elementales excluyentes no pueden ser ambos 1 (como sucede con las preguntas «¿es primavera?» y «¿es verano?»).
- (ii) Los resultados de un conjunto exhaustivo de experimentos elementales y excluyentes dos a dos han de ser 1 en uno de los experimentos y 0 en todos los demás (como ocurre con las preguntas «¿es primavera?», «¿es verano?», «¿es otoño?», «¿es invierno?»).

Los conjuntos de experimentos elementales en los que resulta imposible hacer dicha asignación de resultados reciben el nombre de conjuntos de Kochen-Specker (KS). Su existencia demuestra que el universo no admite descripciones que cumplan la hipótesis de no contextualidad.

### ¿Conjuntos mínimos?

El conjunto original propuesto por Kochen y Specker constaba de 117 experi-

mentos elementales sobre un sistema cuántico de dimensión 3, los cuales daban lugar a 118 contextos. Durante muchos años, los conjuntos de KS no pasaron de ser una curiosidad teórica. Nadie pensó en trasladarlos al laboratorio, pues resultaban demasiado complicados y no se sabía que pudieran tener aplicación práctica alguna.

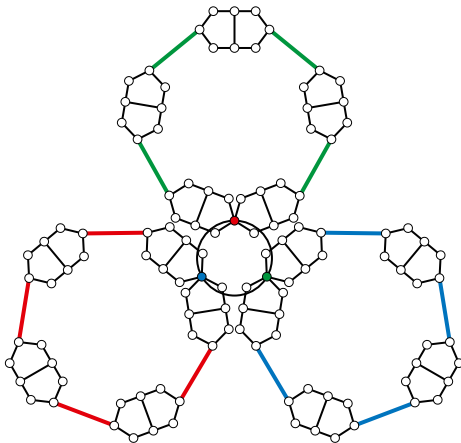
En 1996, junto con José Manuel Esteban Baranz y Guillermo García Alcaine, de la Universidad Complutense de Madrid, encontramos un conjunto de KS mucho más simple que el original. Aún hoy, se trata del conjunto de KS con el menor número de experimentos elementales conocido: 18. Tales experimentos corresponden a preguntas sobre un sistema de dimensión 4 y dan lugar a 9 contextos. Sobre este conjunto, Mladen Pavičić, de la Universidad de Zagreb, escribió que era asombroso que hubiese sido descubierto «por humanos» y no por ordenadores.

Fue la sencillez de dicho conjunto la que, años más tarde, permitiría llevar el teorema de Kochen-Specker al laboratorio. En 2013, un equipo formado por investigadores de la Universidad de Estocolmo, La Sapienza de Roma y la Universidad de Sevilla logramos comprobar empíricamente cómo las respuestas a las 18 preguntas del experimento violaban, tal y como predice la teoría cuántica, cierta desigualdad que debería cumplir cualquier teoría no contextual. Hicimos el experimento dos veces, usando cada vez un sistema físico distinto: primero, con la polarización y dos modos espaciales de fotones individuales; después, con la polarización y dos estados del momento angular orbital de fotones individuales.

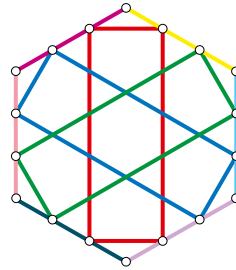
La búsqueda de otros conjuntos de KS simples no se detuvo ahí. El año pasado, junto con Petr Lisoněk, de la Universidad Simon Fraser en Burnaby, Canadá, Piotr Badziąg, de la Universidad de Estocolmo, y José Ramón Portillo, de la Universidad

En 1967, Simon Kocher y Ernst Specker demostraron matemáticamente que la mecánica cuántica resulta incompatible con cualquier teoría basada en variables ocultas «no contextuales». Estas últimas parten de dos premisas que, desde un punto de vista clásico, parecen irrenunciables: que las propiedades de un sistema físico se encuentran bien definidas antes de medirlas, y que son independientes del conjunto de experimentos que llevemos a cabo para determinarlas. En este ámbito, un «contexto» denota un conjunto de experimentos cuyos resultados tienen probabilidades bien definidas con independencia del orden en que se hagan.

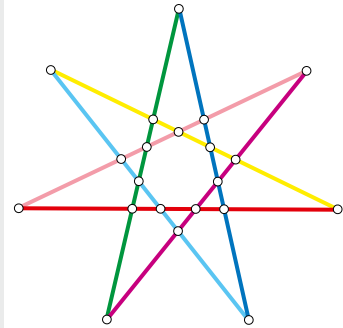
Esa incompatibilidad entre la mecánica cuántica y las teorías no contextuales se hace manifiesta en los conjuntos de Kochen-Specker (KS, *abajo*): combinaciones intrincadas de experimentos elementales (con resultados posibles 1 y 0, o «sí» y «no») en las que las predicciones de la primera difieren de las de las segundas. Hace poco, un conjunto de KS consiguió llevarse a la práctica por primera vez en un laboratorio.



El conjunto original de Kochen y Specker constaba de 117 experimentos elementales y 118 contextos. Aquí, cada experimento elemental queda representado por un nodo. Los nodos que se encuentran en una misma recta o en la circunferencia conforman un contexto. El experimento asociado al nodo rojo pertenece a 9 contextos: el representado por la circunferencia, 4 contextos indicados por segmentos negros y los 4 correspondientes a los segmentos rojos. Una relación análoga se aplica a los nodos verde y azul.



En 1996, el autor y otros colaboradores encontraron un conjunto de KS mucho más simple que el original. Compuesto por 18 experimentos (nodos) y 9 contextos (colores), se trata del conjunto de KS con el menor número de experimentos elementales conocido. Gracias a ello, hace poco fue posible implementarlo en el laboratorio.



Este diagrama muestra el conjunto de KS con el menor número de contextos conocido hasta la fecha. Hallado el año pasado, cuenta con 21 experimentos elementales (nodos) y 7 contextos (colores).

de Sevilla, dimos un paso más y hallamos el conjunto de KS con el menor número de contextos conocido: 7. Una vez más, los humanos nos hemos adelantado a los ordenadores. Es más, en este caso, el conjunto se encuentra en el límite de lo que los ordenadores actuales pueden encontrar mediante una búsqueda exhaustiva: 21 experimentos elementales sobre un sistema de dimensión 6.

Curiosamente, las búsquedas con ordenador parecen indicar que los dos conjuntos de KS que acabamos de describir contienen, respectivamente, el menor número de experimentos elementales y el menor número de contextos posibles.

La sencillez de estos conjuntos de KS ha animado a explorar nuevas aplicacio-

nes y experimentos. Ahora sabemos que los conjuntos de KS cuentan con aplicaciones en criptografía y comunicación cuánticas. Sirven también para certificar que nuestros aparatos de medida están accediendo a sistemas cuánticos de cierta dimensión, y que lo hacen sin necesidad de preparar uno o varios estados cuánticos específicos. Por ejemplo, en un reciente experimento en la Universidad de Concepción, en Chile, hemos usado el conjunto de KS de 7 contextos para certificar que los aparatos de medida acceden a un sistema cuántico concreto de dimensión 6.

Resulta estimulante ver cómo lo que hasta hace poco se consideraba un intrincado pasatiempo matemático se está

convirtiendo en una herramienta práctica para la investigación básica.

—Adán Cabello  
Universidad de Sevilla

PARA SABER MÁS

**Experimental implementation of a Kochen-Specker set of quantum tests.** Vincenzo D'Ambrosio et al. en *Physical Review X*, vol. 3, n.º 1, pág. 011012, 14 de febrero de 2013.

**Kochen-Specker set with seven contexts.** Petr Lisoněk et al. en *Physical Review A*, vol. 89, n.º 4, pág. 042101, 1 de abril de 2014.

**Applying the simplest Kochen-Specker set for quantum information processing.** Gustavo Cañas et al. en *Physical Review Letters*, vol. 113, n.º 9, pág. 090404, 28 de agosto de 2014.