

BRK-009 · Los fundamentos cuánticos pasan a ser distinguibles experimentalmente

BRK · Rupturas conceptuales

Juan Seguro · All Rights Reserved

Dos explicaciones de la naturaleza pueden reproducir muchas de las mismas observaciones y, aun así, discrepar sobre una combinación de mediciones cuidadosamente elegida. El trabajo de Bell hizo explícita esa discrepancia para las correlaciones cuánticas. El debate sobre si la mecánica cuántica necesitaba una explicación más completa de los sucesos individuales adquirió una restricción matemática que los experimentos podían poner a prueba.

La ruptura no fue descubrir que todas las preguntas filosóficas se habían convertido en preguntas de laboratorio. Fue más limitada y más potente: ciertos supuestos sobre resultados producidos localmente implican restricciones sobre las correlaciones observables. La mecánica cuántica predice violaciones de esas restricciones. Por tanto, los supuestos, la predicción estadística y la realización experimental pueden examinarse por separado.

1. La correlación por sí sola nunca bastó

Los objetos correlacionados ordinarios no establecen un misterio cuántico. Dos sobres pueden contener respuestas opuestas fijadas durante su preparación. Abrir uno revela entonces qué contiene el otro, sin cambiar nada en el lugar distante. Observar resultados opuestos es compatible con esta explicación.

La dificultad aparece cuando los investigadores pueden elegir mediciones diferentes después de preparar un par. Una explicación local propuesta debe reproducir las correlaciones de todas las combinaciones pertinentes de elecciones, no solo de una combinación conveniente. El artículo de Bell de 1964 formuló esta dificultad para el estado singlete de dos partículas de espín un medio. [1]

Bell no demostró que toda teoría con variables adicionales fuera imposible. Su artículo examina explícitamente una explicación de variables ocultas no local. Lo importante es la conjunción de supuestos que se pone a prueba. Tratar el resultado como una prohibición de pensar en una explicación física subyacente borra la estructura del teorema.

2. Una restricción que puede calcularse

Una formulación posterior útil es la desigualdad CHSH, llamada así por Clauser, Horne, Shimony y Holt, cuyo artículo de 1969 conectó el resultado de Bell con experimentos realizables.

Supongamos que cada lado tiene dos ajustes posibles de medición y que cada resultado registrado es $+1$ o -1 . Escribamos los resultados asignados por un modelo determinista local como A , A' , B y B' . [2]

Para una asignación, consideremos $A(B + B') + A'(B - B')$. Como B y B' valen cada uno ± 1 , uno de los paréntesis es cero y el otro es ± 2 . La expresión debe ser, por tanto, $+2$ o -2 . Promediar sobre las asignaciones da una cota absoluta de 2 para la combinación correspondiente de correlaciones.

Este breve cálculo es una versión explicativa moderna de la cota, no una transcripción de la deducción de Bell de 1964. También revela un supuesto importante: al promediar las distintas combinaciones de ajustes se utiliza la misma distribución de

estados subyacentes. Si esa distribución depende sin restricciones de las elecciones de medición, el argumento deja de establecer esta cota.

Pueden incluirse modelos estocásticos locales representando su aleatoriedad adicional en la especificación subyacente. Sustituir instrucciones deterministas por probabilidades locales no permite eludir el resultado. Sin embargo, las condiciones precisas siguen importando: deben declararse la localidad, los supuestos de independencia que relacionan preparación y elecciones, y el tratamiento de los sucesos registrados.

3. Por qué las predicciones cuánticas hacen interesante la cota

Para mediciones adecuadas sobre un par entrelazado, la mecánica cuántica predice una magnitud CHSH de $2\sqrt{2}$, aproximadamente 2,828. La distinción entre ese valor y 2 da al experimento algo definido que discriminar. No exige que un laboratorio observe de alguna manera cuatro mediciones incompatibles sobre la misma partícula a la vez.

En su lugar, muchos ensayos utilizan pares de ajustes diferentes. Las correlaciones observadas se componen a partir de esos ensayos. Para que esta composición ponga a prueba la desigualdad pretendida, las reglas de selección y clasificación de los ensayos no deben fabricar un subconjunto favorable. La cota matemática y las reglas prácticas para construir la muestra pertenecen a la misma explicación.

Una violación excluye la clase de modelos locales especificada bajo los supuestos experimentales. No selecciona una interpretación única de la mecánica cuántica. Tampoco identifica un mensaje controlable enviado de una estación a otra. Las correlaciones

fuertes entre resultados conjuntos y la capacidad de elegir el resultado marginal distante son afirmaciones diferentes.

4. Las mejoras experimentales cambian qué objeciones permanecen

El experimento de Aspect, Dalibard y Roger de 1982 utilizó analizadores que cambiaban de ajuste durante el vuelo de los fotones. Abordaba la preocupación de que unos ajustes fijados con suficiente antelación permitieran una comunicación ordinaria que coordinara los resultados. El experimento supuso un paso importante, pero no debe describirse retrospectivamente como un diseño que cerraba todas las lagunas experimentales. [3]

La eficiencia de detección plantea otra dificultad. Si solo se observa un subconjunto de los pares emitidos, una explicación podría aprovechar las diferencias entre sucesos detectados y no detectados. Un control de localidad no resuelve automáticamente un problema de detección. A la inversa, una detección muy eficiente no establece automáticamente una separación espaciotemporal suficiente.

En 2015, Hensen y sus colaboradores presentaron una violación de una desigualdad de Bell utilizando espines electrónicos separados por 1,3 kilómetros, combinando en un experimento controles sobre las principales lagunas de localidad y detección. La afirmación publicada se refiere a un contraste estadístico con una muestra finita, no a una imposibilidad lógica establecida por un solo par de resultados. [4]

Llamar a un experimento «libre de lagunas» es, por tanto, una abreviatura con un alcance definido. Ningún experimento elimina la necesidad de confiar en todas las características de su funcionamiento, y ninguna etiqueta de ese tipo vuelve experimentalmente imposibles las correlaciones sin restricciones entre

elecciones de medición y variables ocultas. La fuerza del resultado reside en los controles explícitos y la inferencia cuantificada, no en quedar exento de supuestos.

5. El cambio en lo que contaba como disputa científica

Una explicación subyacente podía parecer protegida por la afirmación de que sus variables eran inobservables. Los razonamientos del tipo de Bell muestran por qué esa protección puede fallar. No es necesario observar individualmente las variables si la estructura propuesta restringe la estadística de los resultados accesibles. La inobservabilidad de un mecanismo no garantiza la equivalencia observacional de las teorías.

La afirmación inversa es igualmente importante. Un desacuerdo entre interpretaciones no implica automáticamente una predicción experimental distinta. Si dos explicaciones reproducen las mismas probabilidades pertinentes, esta clase de experimento no las distingue. Describir toda interpretación como refutada o confirmada por los experimentos de Bell atribuye a la evidencia más de lo que puede respaldar.

El logro histórico fue una secuencia de transformaciones: una pregunta conceptual se convirtió en una desigualdad, una desigualdad en un diseño experimental y las debilidades experimentales en objetivos de nuevos diseños. Ni las matemáticas por sí solas ni los instrumentos por sí solos completaron la transición. El resultado perdurable es una explicación más precisa de qué supuestos pueden mantenerse juntos al confrontarse con correlaciones medidas.

Lectura relacionada

El artículo BRK 008, «Poner a prueba la gravedad: de 1915 a 1975», examina cómo los marcos comunes de comparación permiten a los

experimentos distinguir teorías que comparten muchas predicciones exitosas.

Referencias

- [1] Bell, J. S. "On the Einstein Podolsky Rosen Paradox." *Physics Physique Fizika* 1, 195–200 (1964). <https://doi.org/10.1103/PhysicsPhysiqueFizika.1.195>
- [2] Clauser, J. F., Horne, M. A., Shimony, A., y Holt, R. A. "Proposed Experiment to Test Local Hidden-Variable Theories." *Physical Review Letters* 23, 880–884 (1969). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.23.880>
- [3] Aspect, A., Dalibard, J., y Roger, G. "Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time-Varying Analyzers." *Physical Review Letters* 49, 1804–1807 (1982). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.49.1804>
- [4] Hensen, B., et al. "Loophole-free Bell inequality violation using electron spins separated by 1.3 kilometres." *Nature* 526, 682–686 (2015). <https://doi.org/10.1038/nature15759>