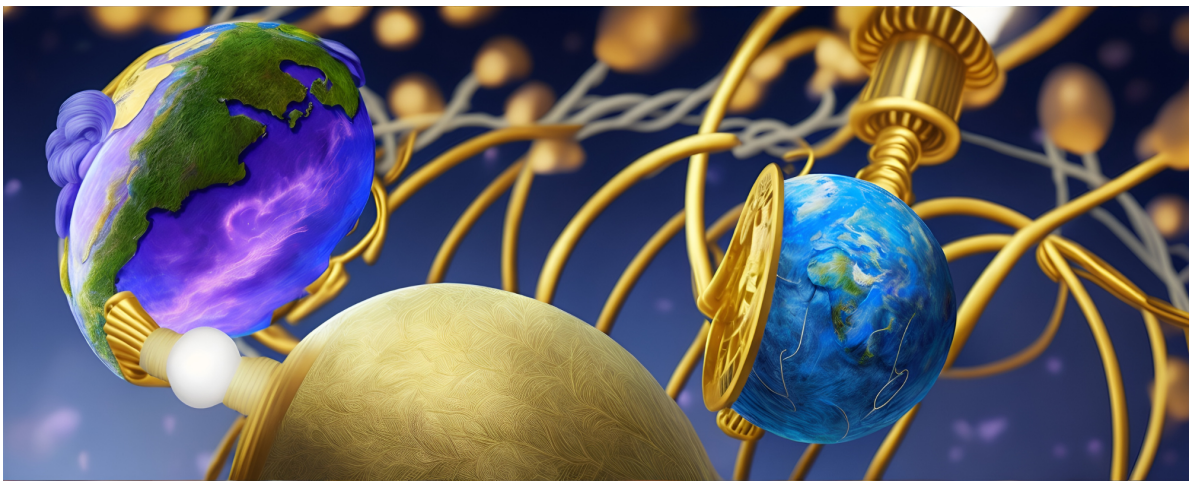
CUÁNTICA Y HUMANIDADES

El espacio después de la revolución cuántica

Carl Hoefer



El cosmos

¿Cómo es el universo, en sus aspectos más básicos y fundamentales? Bien, todos sabemos que la manera como se comportan las cosas materiales, en los niveles más microscópicos, es, como mínimo, extraña. La mecánica cuántica nos dice que las cosas más pequeñas que forman la materia que vemos a nuestro alrededor a veces actúan como partículas minúsculas con ubicaciones bien definidas. En cambio, en otras ocasiones, actúan como una especie de fenómeno ondulatorio, extendiéndose en el espacio. Además, su comportamiento es imprevisible, ya que a veces dan «saltos cuánticos» de un estado a otro.

Pero dejamos un momento la materia y su comportamiento. Quizás no habéis oído decir que la revolución cuántica ha cambiado de manera fundamental nuestra comprensión del espacio y el tiempo, de manera que seguís viviendo en el mundo cómodo y cotidiano de los objetos de medida media, distribuidos en el espacio con posiciones y estados de movimiento bien definidos, que existen a lo largo del tiempo y que normalmente cambian sus ubicaciones (en el espacio y entre sí) a medida que pasa el tiempo. Además, la distancia espacial entre las cosas *importa*: los objetos sólo se pueden afectar los unos a los otros por contacto directo; o, si se pueden afectar «a distancia», por ejemplo mediante la gravedad o por campos electromagnéticos como la luz, entonces la separación espacial limita fuertemente estos efectos. Como más alejadas estén dos cosas, la una de la otra, menos se pueden afectar mutuamente. Los objetos extremamente distantes no tienen esencialmente ningún efecto en aquello que pasa en el aquí y el ahora.

Así es como pensábamos sobre nuestro universo en el siglo XIX y anteriormente; y todavía es así como lo entendemos en nuestra vida cotidiana. De hecho, la principal diferencia en la manera como hoy pensamos en el universo, en comparación con lo que pensaba un europeo culto después de Galileo y Newton, probablemente tiene que ver con su inmensidad: ahora sabemos que nuestro Sol y los planetas ocupan una porción minúscula de una galaxia lenticular inmensa (la Vía Láctea), que sólo es una de los centenares de miles de millones de galaxias que podemos ver en la parte del universo que es visible para nosotros.

Es bien probable que sepáis que las teorías de la relatividad especial y general de Einstein (1905 y 1915, respectivamente) echaran a perder nuestra concepción clásica y de sentido común del espacio y el tiempo. El espacio y el tiempo, en la física clásica —y también cuando pensamos con nuestro sentido común, todavía hoy— son cosas bien diferentes. El *espacio* se entiende, cuando menos metafóricamente, como un contenedor donde cada cosa física ocupa un lugar. El *tiempo* es una cosa que pasa inexorablemente, para todo el mundo y en todas partes exactamente de la misma manera: minuto tras minuto, día tras día, nos movemos avanzando hacia lo que es, para nosotros el ahora, el futuro.

> Las teorías de la relatividad de Einstein llevaron algunos cambios radicales en nuestras concepciones del espacio y el tiempo. Algunos físicos y filósofos han argumentado que las teorías de la relatividad nos obligan a renunciar a la idea de que el tiempo pasa

Las teorías de la relatividad de Einstein llevaron algunos cambios radicales en nuestras concepciones del espacio y el tiempo. El tiempo dejó de ser un *absoluto* que transcurría de la misma manera para todo el mundo en el universo y se convirtió en algo dependiente del estado de movimiento de cada uno. Algunos físicos y filósofos, incluso, han argumentado que las teorías de la relatividad nos obligan a renunciar a la idea de que el tiempo *pasa*. Es bien conocido el lema que, después de Einstein, el tiempo no es sino una cuarta dimensión de la realidad al lado de las tres dimensiones espaciales, si bien es una dimensión que se diferencia de las dimensiones espaciales en aspectos importantes. Finalmente, según la teoría de la relatividad general, incluso el espacio cambió radicalmente: en lugar de un contenedor homogéneo donde las leyes de la geometría euclidiana se cumplían en todas partes, el espacio era «curvo», se doblaba y se estiraba de manera variable por los efectos gravitatorios de los cuerpos masivos. Y no sólo es el espacio que está deformado según la relatividad general: el tiempo mismo puede llegar a curvarse tanto por intensos campos de gravedad que acaba haciendo un bucle. El viaje al pasado se convierte en una posibilidad física, tal como se muestra a la película *Interstellar* de 2014.

Localidad

Estas revisiones de nuestras concepciones cotidianas del espacio y el tiempo son fascinantes y radicales, y es una lástima que ahora no nos podamos adentrar. Si las

menciono es porque, a pesar de su radicalidad, las innovaciones de Einstein no cambiaron nuestra capacidad de pensar que el mundo consiste en objetos tridimensionales, repartidos en un inmenso contenedor (espacio) y existentes a través del tiempo. Las teorías de la relatividad tampoco debilitaron nuestra creencia que los objetos distantes en el espacio a duras penas afectan a lo que pasa en el aquí y el ahora. Todo lo contrario, la reforzaron. Según las teorías de Einstein, los objetos separados espacialmente sólo se pueden influir los unos en los otros por la propagación de algún cuerpo material o campo entre ellos, y esta influencia nunca se puede propagar más rápidamente que la velocidad de la luz (en contraste con la teoría de la gravedad de Newton como fuerza instantánea, que disminuye con la distancia en proporción inversa al cuadrado de la distancia entre los objetos). Esta prohibición einsteiniana de las influencias que son instantáneas, o que se propagan más rápidamente que la velocidad de la luz (c), llegó a ser considerada un pilar fundamental de la física en el siglo XX, y se suele conocer como a principio de localidad o localidad de Einstein (que de ahora en adelante llamaremos localidad). El mismo Einstein pensaba que la localidad era tan fundamental para la ciencia física que a duras penas podríamos avanzar en este campo si renunciábamos. [1]

Teniendo en cuenta que Einstein fue uno de los primeros fundadores de la mecánica cuántica, es una ironía que una de las maneras más significativas pero menos conocidas en que la física cuántica revoluciona nuestra comprensión del mundo físico sea precisamente que derroca la localidad. Einstein lo vio enseguida, y fue el motivo principal de su oposición a la teoría cuántica desarrollada en los años veinte del siglo pasado. Einstein no podía aceptar el «efecto fantasmagórico a distancia» que parecía postular la teoría cuántica, y durante muchos años buscó una teoría alternativa que fuera coherente con los fenómenos cuánticos conocidos y que protegiera la localidad.

De lo que Einstein no se dio cuenta —de lo que nadie se dio cuenta, hasta las obras fundamentales de John Bell de los años sesenta— es que sería posible establecer definitivamente, en el laboratorio, si la naturaleza presenta fallos de localidad o no. El Premio Nobel de Física del 2022 se otorgó a físicos experimentales que establecieron, por medio de una serie de experimentos llevados a cabo entre la década de 1970 y principios de los 2000, que la naturaleza sí que viola la localidad, tal como predice la teoría cuántica. Bell podría haber sido cogalardonado con el Nobel si no fuera porque su muerte, en 1990, lo hizo inelegible.

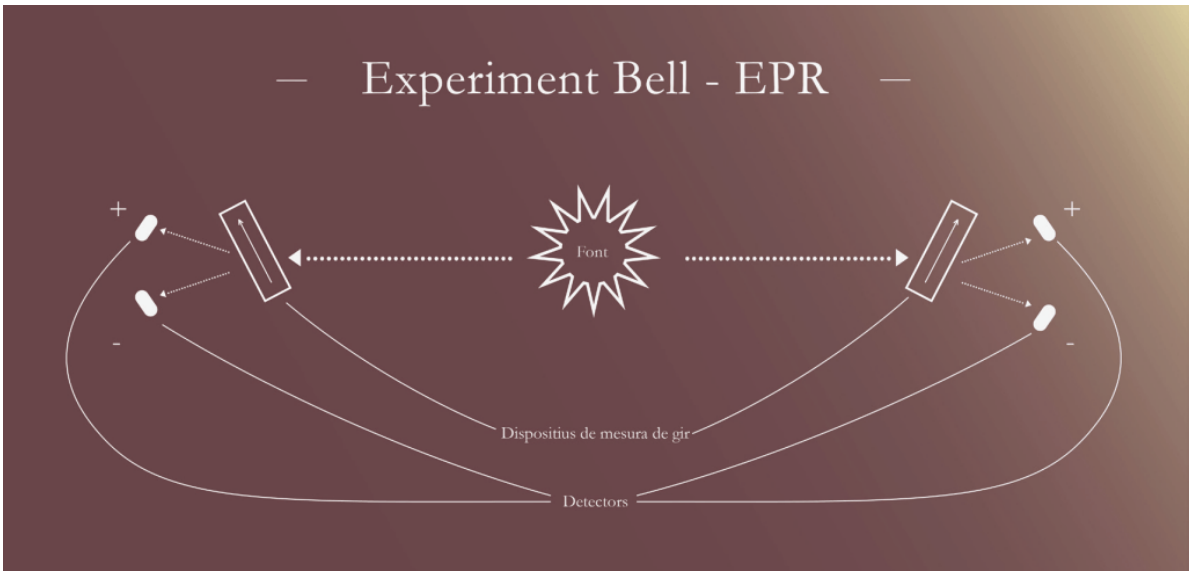
Para entenderlo mejor, tenemos que retroceder un poco y hablar sobre cómo la mecánica cuántica predice los fenómenos no locales.

La no localidad cuántica

Según la mecánica cuántica, las partículas que han interaccionado en el pasado, o que comparten un origen común (por ejemplo, pares de fotones generados por colisión de partículas más pesadas), tienen estados que están *entrelazados*, es decir, las propiedades de una partícula están relacionadas —coordinadas— con las propiedades de la otra partícula. Y lo que es más importante: esta conexión sigue siendo una característica de

ambas partículas, por muy lejos que viajen, hasta que (quizás) se produce alguna interacción con un tercer sistema que rompa el entrelazamiento. La conexión no disminuye con la distancia. [2]

Por ejemplo, dos fotones pueden ser emitidos por un átomo a un estado de alta energía de manera tal que uno se detectará a un lado de un laboratorio y el otro, en el lado opuesto. Los spins de los fotones (el spin es una especie de momento angular intrínseco que poseen las partículas) se representan en el estado cuántico como *indeterminados*: no tienen ningún valor definido antes de medirse, sólo probabilidades de manifestar valores diversos. Pero los valores están inexorablemente ligados: una vez detectado y medido un fotón en un lado del laboratorio es seguro de que, si el otro fotón se mide de la misma manera, al otro lado del laboratorio, se obtendrá un resultado específico determinado. En el lenguaje que a veces se utiliza para hablar de mediciones cuánticas, la medición del spin de un fotón «colapsa» el estado de ambos fotones para que tengan valores definidos. En cierta manera, medir uno de los dos es medirlos los dos, incluso si están separados por kilómetros o por millones de kilómetros. Las mediciones del spin siempre se hacen utilizando dispositivos orientados a lo largo de un eje espacial determinado, tal como se muestra en la figura 1. Las partículas entrelazadas en un estado *singlet* cuántico siempre darán resultados opuestos, si se miden con aparatos orientados en la misma dirección, independientemente de la dirección escogida. Más adelante veremos qué pasa cuando los aparatos no están orientados exactamente en la misma dirección.



Representación gráfica del experimento Bell – EPR

Si pensamos en estas conexiones entre los resultados de las mediciones, es natural sospechar que todas las mediciones lo que hacen realmente es revelar propiedades que ya poseían las partículas cuánticas. Estas propiedades preexistentes a veces se llaman *variables ocultas*, porque no se encuentran en la descripción mecánica cuántica del par de partículas. Esta idea, pues, implica la suposición de que la descripción mecánica cuántica de las partículas (que describía las partículas como indeterminadas con respecto a propiedades como la posición, el momento o el spin) es incompleta. Por lo tanto, la

mecánica cuántica sería sólo una teoría útil para hacer predicciones estadísticas, pero no una teoría que describa directa y completamente la realidad microscópica. Eso es precisamente lo que sostenía Einstein. ¿Un famoso trabajo escrito conjuntamente por Einstein, Nathan Rosen y Boris Podolsky el año 1935, ahora conocido como el documento EPR, se titulaba “Se puede considerar completa la descripción mecánica cuántica de la realidad física?”.

La visión de Bell

Así pues, tenemos dos maneras de pensar en las partículas entrelazadas. Según la mecánica cuántica, no tienen propiedades definidas, por ejemplo, de spin a lo largo de un eje dado, antes de la medición; pero la medición del spin de una partícula hace que instantáneamente la medición de la otra partícula de la pareja dé el resultado contrario (eso si las medidas se hacen con aparatos orientados hacia la misma dirección). Para mediciones en que, por ejemplo, el spin de una partícula se mide en la dirección x, y la otra partícula de la pareja se mide a lo largo de un eje de grados de distancia de x, la mecánica cuántica predice cómo estarán de anticorrelacionados los resultados, en función de . Según la manera de pensar de Einstein, desde el momento de la separación, cada partícula tiene propiedades definidas que determinarán el resultado de la medición, tanto si se hace en el mismo eje como si se hace en ejes diferentes.

La genial visión de Bell al principio de la década de 1960 fue que, si la perspectiva de Einstein era correcta, entonces había límites superiores para la cantidad de correlación que se podía observar entre las mediciones hechas a diferentes ángulos . De hecho, con un argumento sencillo pero ingenioso, Bell demostró que, para un gran número de mediciones de spin en lados opuestos de un laboratorio, hechos en uno de los tres ángulos de los ejes (llamaremos 1, 2 y 3 los ángulos que se medirán en un recorrido dado, que se tiene que determinar mediante un procedimiento de aleatorización, como lanzar una moneda al aire), hay un límite matemático a la suma de las correlaciones para mediciones en los ángulos (1, 2), (1, 3) y (2, 3). [3] Este límite se impone estrictamente por lógica, asumiendo que las partículas no pueden influir directamente en los resultados de las mediciones de las otras, sino que los resultados de las mediciones están determinados exclusivamente por las propiedades que ya tenía la partícula al entrar en el aparato de medir. Esta suposición, claro está, es precisamente el principio de localidad.

> Según la mecánica cuántica, las partículas que han interaccionado en el pasado o que comparten un origen común tienen estados que están entrelazados. La conexión no disminuye con la distancia

Lo que Bell demostró, pues, es que, si la localidad es cierta, hay un límite superior a las sumas de correlaciones para mediciones hechas por aparatos separados espacialmente. Lo interesante es que la mecánica cuántica predice sumas de correlaciones que superan el

límite superior de Bell. ¿Cómo es posible? Bien, como ya hemos dicho, la mecánica cuántica predice que medir una partícula hace que de manera instantánea la medición de otra partícula o bien dará el resultado contrario (si se mide a lo largo del mismo eje), o bien tendrá una cierta probabilidad de dar el resultado contrario si se mide en un ángulo que difiere en grados, una probabilidad que es diferente de la probabilidad asignada antes de que la primera partícula sea mesurada. Dicho en otras palabras, las mismas predicciones de la mecánica cuántica violan la localidad, por lo tanto, el límite de Bell no es aplicable.

La localidad falla en el laboratorio

Lo que han demostrado décadas de experimentos es que las predicciones de la mecánica cuántica se cumplen y que el límite de Bell es superado por los resultados de las mediciones que nos da la naturaleza. ¿Sin embargo, a qué nos referimos realmente cuándo decimos que el resultado de la medición de una partícula cambia instantáneamente las probabilidades de los posibles resultados de la otra partícula? Según el formalismo de la mecánica cuántica estándar y no relativista, quiere decir exactamente lo que hemos dicho: hay un cambio instantáneo en la partícula a pesar de su separación espacial (que, teóricamente, puede ser tan grande como queramos), de la misma manera que se suponía que la gravedad newtoniana actuaba instantáneamente. Pero los efectos de medir una partícula no tienen que viajar ni propagarse de la primera partícula a la segunda; ni tampoco estos efectos disminuyen de ninguna manera a medida que aumenta la distancia entre las partículas, a diferencia de la fuerza de la gravedad. Los experimentos que el año 1982 hizo Alain Aspect, uno de los Premios Nobel del 2022, establecieron que el efecto es realmente instantáneo, o, cuando menos, que viaja más rápidamente que la velocidad de la luz (si suponemos, contrariamente a lo que parece decir la mecánica cuántica, que el efecto tiene que viajar de una manera u otra de un lado a otro del laboratorio). Aspect midió los fotones a cada lado de su laboratorio exactamente al mismo tiempo, con una precisión del tiempo que descartaba que cualquier señal a la velocidad de la luz (o más lenta) pasara de la medición de una partícula a la de la otra. [4]

Esta aparente violación de la localidad es, en cierto modo, chocante, y algunos físicos han intentado rechazarla cuestionando el razonamiento de Bell o rechazando alguna otra premisa tácita del argumento de Bell en lugar de la localidad. Como aquí no podemos entrar en todas las posibilidades lógicas, la situación resumida es la siguiente: sólo quedan dos maneras de restaurar la localidad ante los hechos experimentales. La primera se conoce como superdeterminismo y consiste en postular correlaciones entre las propiedades ocultas que tienen las partículas antes de medirlas y las opciones del ángulo de medición a cada lado del laboratorio. Estas elecciones se hacen tirando una moneda al aire, con un generador de números aleatorios o con otro método. Por eso, postular correlaciones entre lo que determinan estas elecciones y las propiedades de spin que tienen las partículas, para la mayoría de físicos y filósofos, es conspirar demasiado. La otra manera de preservar la localidad es postular que los mismos acontecimientos de medición influencian o determinan causalmente las propiedades previas que tienen las partículas desde el momento de su emisión. Dicho en otras palabras, si postulamos una causalidad que recula en el tiempo, podemos (técnicamente) preservar el principio que todas las influencias causales «viajan» a

una velocidad más lenta que c. Igual que con el superdeterminismo, la retrocausalidad se suele considerar mucho menos plausible que aceptar simplemente que la naturaleza muestra no localidad.

¿Adiós al espacio?

Recordaréis que la conexión entre partículas cuánticas entrelazadas es completamente independiente de su aparente separación espacial. Las partículas se comportan, de hecho, como si interactuar con una fuera, *ipso facto*, interactuar con las dos. Eso también lo sugiere una lectura natural y sencilla de la manera como se representa el estado de las dos partículas en el formalismo cuántico. El «espacio» de este formalismo es un espacio matemático de muchas dimensiones (un espacio de Hilbert o espacio de configuración) que tiene una dimensión para cada grado básico de libertad de cada partícula en un conjunto de grados de libertad compatibles o conmutantes. Si representamos una partícula masiva con spin, necesitamos un espacio de cuatro dimensiones: tres dimensiones para los grados de libertad espaciales (ubicación en dirección x y direcciones y y z), y un grado más de libertad para su momento angular de spin. Si representamos un sistema de *dos* partículas masivas con spin, ahora necesitaremos ocho dimensiones; y así sucesivamente si vamos añadiendo más partículas. Entonces, los estados entrelazados escogen subregiones especiales de nuestro espacio de alta dimensión como las que están físicamente permitidas, aquellas a partir de las cuales los resultados de la medida «seleccionan» una subregión todavía más restringida. El punto clave es que el proceso de medición «toca» ambas partículas al mismo tiempo, seleccionando alguna región del espacio de ocho dimensiones como región que representa las propiedades del sistema combinado.

Aunque algunos filósofos han defendido esta afirmación, la cuestión no es que la teoría cuántica nos invite a creer que el verdadero espacio de nuestro cosmos no es nuestro conocido espacio tridimensional sino un espacio de configuración de dimensiones inmensas. La cuestión es que la teoría cuántica nos invita a considerar la posibilidad de que el espacio tridimensional del sentido común no sea tan fundamental como hemos creído tradicionalmente. De hecho, nos invita a considerar la posibilidad de que el espacio tridimensional del sentido común sólo sea el que los filósofos denominan una mera apariencia: una herramienta útil de nuestros sistemas perceptivos y de nuestros primeros pasos científicos, pero en absoluto una parte del «mobiliario del mundo» fundamental.

> La teoría cuántica nos invita a considerar la posibilidad de que el espacio tridimensional del sentido común sólo sea aquello que los filósofos denominan una mera apariencia: una herramienta útil de nuestros sistemas perceptivos, pero en absoluto una parte del «mobiliario del mundo» fundamental

Esta puede parecer una conclusión radical que se pueda extraer de experimentos con

partículas preparadas especialmente, pero de hecho el entrelazamiento es un fenómeno bastante omnipresente en las teorías cuánticas, aunque sus efectos no son directamente visibles para nosotros en la vida diaria. La mayoría de las interacciones de partículas y campos producen entrelazamiento; por ejemplo, cuando un átomo emite un fotón, los momentos del átomo y el fotón se entrelazan. Y vale la pena recordar que, poco después del big bang, toda la materia-energía que vemos a nuestro alrededor se comprimió en una pequeña región espacial, en la cual todo interactuaba esencialmente con todo el resto. Desde el punto de vista de un dios, pues, casi todo puede estar conectado no localmente con casi todo el resto. Esta noción está en total desacuerdo con la manera como pensamos en los objetos como islas separadas e independientes en un gran contenedor que mantiene las cosas bien distanciadas las unas de las otras. No es extraño, pues, que muchos físicos hayan intentado encontrar una manera de evitar la conclusión del argumento de Bell.

Más allá de la mecánica cuántica ordinaria: la gravedad cuántica y el espacio

Las violaciones de la localidad basadas en el entrelazamiento que hemos visto no son las únicas pistas que nos muestra la física moderna y que nos hacen pensar que el espacio 3D, o el espaciotiempo 4D, quizás no son características fundamentales de la realidad.

Desde la década de 1930, los físicos han trabajado para intentar unir la teoría de la relatividad general y la mecánica cuántica. A diferencia de las otras «fuerzas» básicas de la naturaleza, débiles, fuertes y electromagnéticas —todas las cuales se dirigen a la perfección según la teoría cuántica—, la cuarta fuerza, la fuerza gravitatoria, se ha resistido a la integración en el mundo cuántico. Después de décadas de intentar cuantificar la gravedad mediante técnicas estándares que no han conseguido los resultados deseados, los físicos empezaron a explorar una serie de enfoques diferentes, algunos de los cuales con fundamentos radicalmente diversos de los de la relatividad general o la teoría cuántica. Aunque hoy por hoy no hay ninguna teoría de la gravedad cuántica que disfrute de una aceptación generalizada, varias teorías postulan entidades fundamentales que son completamente no espaciales (por ejemplo, la teoría de conjuntos causales) o completamente no espaciotemporales (por ejemplo, algunas variantes de la gravitación cuántica de lazos). En algunos de estos enfoques, la idea es que el espacio, o el espaciotiempo, pasa a ser una entidad emergente (o quizás, una propiedad emergente del estado fundamental de nuestro universo). Según estas teorías, algunos de estos «mundos» posibles podrían carecer completamente del espacio o del espaciotiempo tal como los conocemos.

Es demasiado pronto para extraer lecciones filosóficas de cualquier teoría de la gravedad cuántica, pero pensar en las posibilidades es fascinante, tanto para los filósofos como para los físicos. Sólo en el futuro, quizás un futuro bastante lejano, la humanidad sabrá cómo es realmente el cosmos en que vivimos, básicamente hablando. Si tenemos que juzgar por los últimos cien años, parece probable que los retos de la revolución cuántica para nuestra visión de sentido común del cosmos estén lejos de haber sido superados.

REFERENCIAS Y NOTAS

1 — Einstein pensaba que, si acontecimientos arbitrariamente distantes pudieran influir en los acontecimientos del aquí y el ahora, con una fuerza de impacto no disminuida por la distancia, entonces nunca sería posible descartar ninguna hipótesis soñada para explicar lo que pasa aquí y ahora en parte en términos de cosas que suceden al otro lado del globo, o incluso en galaxias lejanas. Por lo tanto, Einstein creía que el principio de localidad era necesario para que los experimentadores pudieran aislar y controlar los factores que determinan los resultados de sus experimentos.

2 — El entrelazamiento se ha convertido en una herramienta y un recurso importante para los campos en crecimiento de la computación cuántica y la criptografía cuántica, tal como se describe en otros artículos de este número.

3 — que llega al lado izquierdo del laboratorio se mide a lo largo del eje 1, y que la partícula que llega al lado derecho se mide a lo largo del eje 2.

4 — Aquí y más arriba, cuando digo *instantáneamente* o *al mismo tiempo*, quiero decir según el marco de referencia adjunto del laboratorio. La teoría de la relatividad nos dice que los observadores que pasaran en naves espaciales rápidas no estarían de acuerdo sobre qué partícula se midió primero —esta es la famosa relatividad de la simultaneidad de las teorías de Einstein. Pero todos y cada uno de los observadores, por muy rápido que se movieran, estarían de acuerdo que cualquier influencia que se propague de la primera medición a la segunda tendría que viajar más rápido que *c*.



Carl Hoefer

Carl Hoefer es profesor de investigación ICREA en la Universidad de Barcelona y doctor en Filosofía por la Universidad de Stanford. Actualmente es director del Instituto de Filosofía Analítica de Barcelona (BIAP). Sus intereses de investigación se centran en cuestiones metafísicas antiguas que examinan la metafísica de la naturaleza que se deriva de las teorías científicas. En particular, trabaja sobre la naturaleza del espacio, el tiempo y el movimiento, especialmente en el ámbito de las teorías de la relatividad de Einstein, y sobre la naturaleza de la probabilidad objetiva. Durante 2009 y 2017 fue editor fundador de la revista *European Journal for Philosophy of Science*, publicada por Springer. Ha trabajado en la Universidad de California, en la London School of Economics y en el Grupo de Investigación en Epistemología y Ciencias Cognitivas (GRECC) de la UAB.