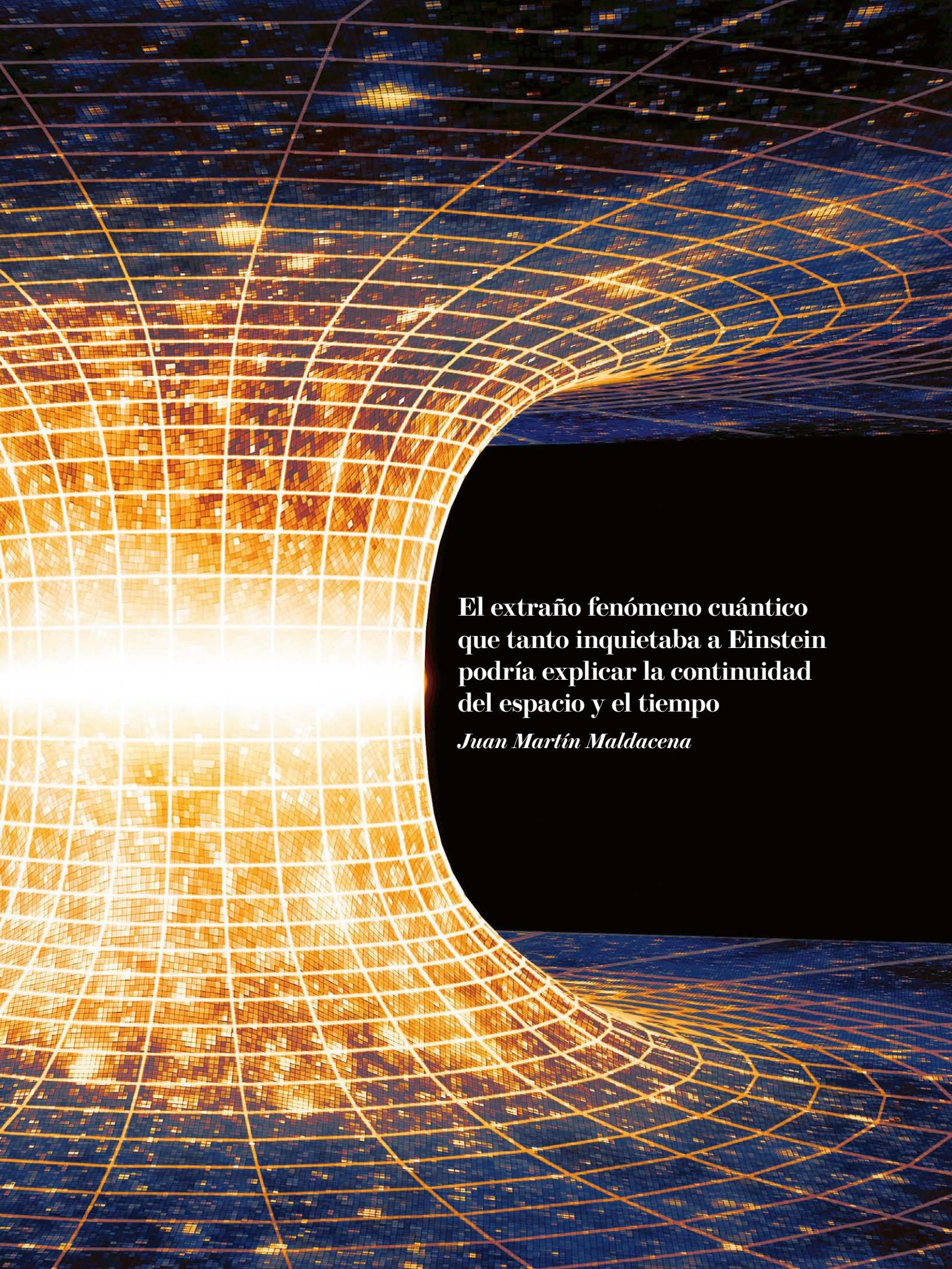
The background of the image is a complex, curved grid structure composed of blue and orange hexagonal and square cells. Small glowing yellow and orange dots are scattered across the grid, representing data points or particles. The grid curves upwards and to the right, creating a sense of depth and perspective.

FÍSICA
TEÓRICA

GEOMETRÍA Y ENTRELAZAMIENTO CUÁNTICO



El extraño fenómeno cuántico que tanto inquietaba a Einstein podría explicar la continuidad del espacio y el tiempo

Juan Martín Maldacena

Juan Maldacena es físico teórico del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton. Ha destacado por sus contribuciones al estudio de la gravedad cuántica y la teoría de cuerdas. En 2012 recibió el Premio de Física Fundamental de la Fundación Milner.



A principios del siglo XX hubo dos revoluciones en física: la mecánica cuántica y la relatividad general. La mecánica cuántica nos enseñó las leyes que rigen el comportamiento del mundo microscópico. La relatividad general, formulada en 1915 por Albert Einstein, es una teoría del espacio y el tiempo. Según ella, el espaciotiempo es curvo y posee una dinámica propia.

Hasta ahora todas las predicciones de ambas teorías se han visto confirmadas por los experimentos. Sin embargo, solemos aplicar una y otra a fenómenos muy distintos. Acostumbramos a emplear la mecánica cuántica para describir el comportamiento de objetos extremadamente pequeños (como átomos o fotones), mientras que usamos la relatividad general para estudiar cómo cambia la geometría del espaciotiempo en presencia de cuerpos muy masivos (estrellas o galaxias, por ejemplo). Para investigar sistemas físicos muy pequeños y masivos, como el universo pocos instantes después de la gran explosión, necesitaríamos disponer de una descripción cuántica del espaciotiempo. Cien años después de que Einstein formulase su teoría, este sigue siendo uno de los mayores retos a los que se enfrenta la física fundamental.

Hace dos años, motivados por un debate reciente relacionado con las propiedades de los agujeros negros, el físico de Stanford Leonard Susskind y el autor de este artículo propusimos una conexión entre dos fenómenos aparentemente paradójicos que ocurren en mecánica cuántica y en relatividad general: el entrelazamiento cuántico y los agujeros de gusano. El primero hace referencia a un tipo de correlación cuántica que puede existir entre dos sistemas físicos distantes. Los agujeros de gusano son «atajos» que aparecen en algunas soluciones de las ecuaciones de Einstein y que conectan regiones muy lejanas del espacio.

A continuación veremos que ambos fenómenos están relacionados. La equivalencia entre ellos puede argumentarse con solidez para algunos casos concretos en los que intervienen agujeros negros, pero parece ser más general. Nuestra idea es que esta relación entre geometría y entrelazamiento tal vez

constituya un principio que toda teoría cuántica del espaciotiempo, o de gravedad cuántica, debería obedecer. Dicho principio tiene consecuencias profundas. Sugiere que, de alguna forma, el espaciotiempo mismo podría emerger a partir del entrelazamiento cuántico de constituyentes microscópicos más fundamentales.

Curiosamente, tanto el entrelazamiento cuántico como los agujeros de gusano se remontan a dos artículos que el propio Einstein escribió en 1935. Ambos trabajos parecen tratar sobre fenómenos muy distintos, y seguramente Einstein nunca sospechó que pudiese haber una conexión entre ellos. De hecho, el entrelazamiento era una propiedad de la mecánica cuántica que molestaba enormemente al físico alemán. En lo que sigue repasaremos ambos artículos y explicaremos su relación desde un punto de vista moderno.

AGUJEROS NEGROS Y AGUJEROS DE GUSANO

Una predicción sorprendente de la teoría de Einstein son los agujeros negros. Estos objetos se forman cuando una gran cantidad de materia se concentra en una región pequeña del espacio. La materia no tiene por qué ser especial; por ejemplo, podríamos crear un agujero negro con aire. Eso sí, necesitaríamos mucho aire: tendríamos que llenar una esfera del tamaño del sistema solar. Pero, si lo hiciéramos, el sistema colapsaría bajo su propio peso y se comprimiría hasta formar un agujero negro.

Todo agujero negro se encuentra rodeado por una superficie imaginaria llamada horizonte de sucesos. Decimos que es imaginaria porque un astronauta que cayese libremente no encontraría nada allí. Sin embargo, una vez que la atravesase, no podría dar la vuelta atrás. Entraría en una región donde el espacio está colapsando hacia una «singularidad», una zona donde la geometría se contrae por completo. Al acercarse a la singularidad, el astronauta moriría despedazado por las fuerzas gravitatorias.

Fuera de la región donde se encuentra la materia, un agujero negro queda descrito por una solución de las ecuaciones de

EN SÍNTESIS

Según la relatividad general, la materia y la energía cambian la geometría del espacio. Cien años después de que Einstein formulase su teoría, los físicos siguen buscando una descripción cuántica del espacio y el tiempo.

La mecánica cuántica y la relatividad general predicen dos fenómenos que parecen permitir la transmisión instantánea de información: el entrelazamiento cuántico y los agujeros de gusano. Ambos fueron estudiados por Einstein en 1935.

Varios trabajos recientes han demostrado que dichos fenómenos están relacionados: el entrelazamiento puede originar una conexión geométrica entre regiones distantes del espacio. La idea sugiere un nuevo principio en gravedad cuántica.

Einstein que fue descubierta en 1916 por el físico Karl Schwarzschild. La motivación original de Schwarzschild era encontrar el campo gravitatorio generado por una masa puntual. De hecho, su solución no contiene materia: todo lo que describe es un campo gravitatorio puro con simetría esférica. Aunque puede parecer una configuración simple, las propiedades de este espaciotiempo resultaron bastante difíciles de interpretar. Una comprensión razonable de su estructura completa no llegó hasta los años sesenta.

En 1935, en uno de los artículos a los que aludímos más arriba, Einstein y Nathan Rosen, uno de sus colaboradores en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, descubrieron un aspecto muy curioso de la solución de Schwarzschild. Hallaron que esta contiene dos espacios independientes unidos por una especie de «tubo». A un instante de tiempo fijo, la geometría puede visualizarse de la siguiente manera: muy lejos de la región central, el espacio es plano (sin curvatura apreciable); pero, a medida que nos acercamos al centro, la geometría se deforma y se conecta con un segundo espacio que también es asintóticamente plano.

La conexión geométrica que acabamos de describir recibe el nombre de «puente de Einstein y Rosen» (ER), o agujero de gusano. Ellos analizaron la geometría de una hipersuperficie a un tiempo fijo (es decir, un espacio curvo de tres dimensiones) años antes de que se entendiera la estructura completa de la solución de Schwarzschild. Su motivación era encontrar una descripción geométrica de las partículas elementales que no fuera singular. Hoy creemos que su interpretación era desacertada.

El puente original de ER une dos espacios independientes. Sin embargo, resulta posible encontrar geometrías similares en las que las dos regiones conectadas pertenecen al mismo espacio. Con algunas pequeñas modificaciones, la solución de Schwarzschild puede también interpretarse como una que contiene dos agujeros negros muy distantes unidos a través de su interior. Imagine que tenemos un agujero negro aquí y otro en una galaxia lejana. Un observador, a quien llamaremos Romeo, está parado a un metro del horizonte de sucesos del primer agujero negro, mientras que Julieta se encuentra a un metro del horizonte del segundo. Si los interiores de ambos agujeros negros están conectados por un puente de ER, la distancia entre Romeo y Julieta a través del agujero de gusano será solo de dos metros, con independencia de cuán lejos se hallen en el espacio ambiente.

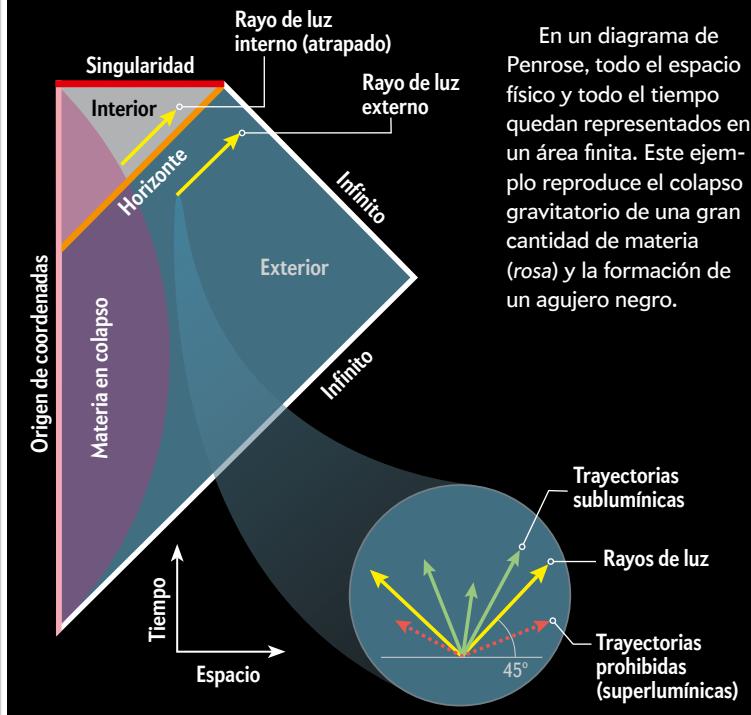
Tales geometrías parecen problemáticas. Recordemos que uno de los principios de la relatividad especial es la imposibilidad de enviar señales más rápido que la luz. Sin embargo, se diría que los agujeros de gusano nos permiten violar este principio, ya que podríamos emplearlos para mandar señales a través de ellos. No obstante, en 1962, Robert W. Fuller, de la Universidad de Columbia, y John A. Wheeler, de la de Princeton,

Causa y efecto en un agujero negro

Los agujeros negros (derecha) se forman cuando una gran cantidad de materia se concentra en una región del espacio lo suficientemente pequeña. En tal caso, el campo gravitatorio en la región que rodea a la materia se torna tan intenso que nada, ni siquiera la luz, puede escapar de allí. La superficie a partir de la cual resulta imposible dar la vuelta atrás recibe el nombre de horizonte de sucesos (*naranja*). Todo objeto que traspase el horizonte caerá inevitablemente hacia una singularidad: una zona en la que la curvatura del espacio se torna infinita (rojo, abajo).



La estructura causal de un agujero negro suele representarse mediante un «diagrama de Penrose» (abajo). En estos diagramas el eje vertical corresponde al tiempo y el horizontal a la coordenada radial (las otras dos direcciones del espacio se omiten). La escala en cada punto se elige de tal manera que los rayos de luz describan siempre líneas rectas a 45 grados. Todas las trayectorias físicas transcurren necesariamente en el interior de estos «conos de luz». Por tanto, un suceso que ocurra en una posición e instante determinados solo podrá afectar a los puntos incluidos en el interior de su cono de luz futuro.



En un diagrama de Penrose, todo el espacio físico y todo el tiempo quedan representados en un área finita. Este ejemplo reproduce el colapso gravitatorio de una gran cantidad de materia (rosa) y la formación de un agujero negro.

demostraron que los puentes de ER no pueden usarse para enviar señales de ningún tipo. Ello se debe a que se trata de geometrías dinámicas en las que el tiempo desempeña un papel importante. Nuestros agujeros de gusano describen la geometría del espacio a un instante de tiempo fijo. Sin embargo, dicha geometría evoluciona con el tiempo. Fuller y Wheeler demostraron que un puente de ER siempre acaba «estirándose»

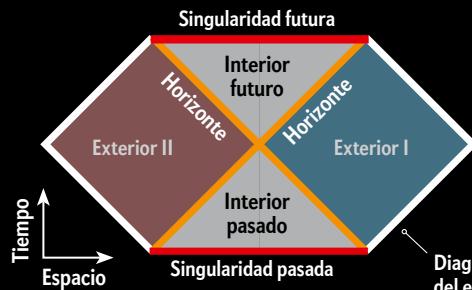
Universos distantes y agujeros de gusano

En 1916, Karl Schwarzschild publicó una solución de las ecuaciones de Einstein correspondiente a un campo gravitacional puro con simetría esférica. Dicha solución no contiene materia; representa un caso idealizado en el que solo hay campo gravitatorio. Más tarde se vio que este descri-

bía una singularidad y un horizonte de sucesos; es decir, un agujero negro. Sin embargo, el espaciotiempo de Schwarzschild esconde una estructura mucho más rica. A continuación se indican sus principales características a partir de su diagrama de Penrose.

Singularidad futura y pasada

El espaciotiempo completo asociado a la solución de Schwarzschild incluye dos singularidades: una en el futuro distante y otra en el pasado remoto. En otras palabras, hay una región donde el espacio está colapsando hacia una singularidad (un agujero negro) y otra en la que el espacio está «saliendo», como si se tratase de una gran explosión. Cada una de estas regiones se encuentra rodeada por su propio horizonte de sucesos.



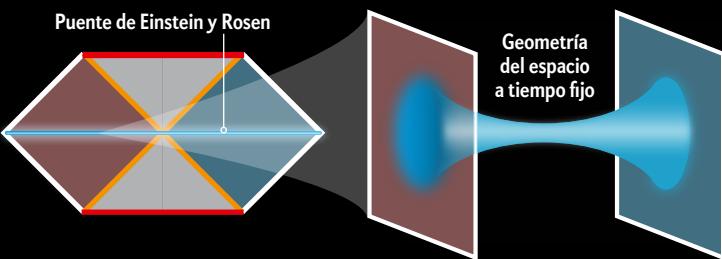
Universos desconexos

Fuera de los horizontes de sucesos, la solución completa de Schwarzschild describe dos espacios independientes. Los rayos de luz no pueden cruzar de uno a otro, por lo que nada de lo que ocurra en una de esas zonas podrá afectar a la otra.

Diagrama de Penrose del espaciotiempo de Schwarzschild

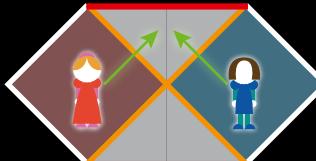
Agujeros de gusano

En 1935, Einstein y Nathan Rosen descubrieron que la solución de Schwarzschild contenía una geometría suave (línea azul, izquierda) que conectaba dos espacios distintos. Este «puente», o agujero de gusano, describe la geometría del espacio en un instante de tiempo fijo (derecha). No puede atravesarse, ya que para ello sería necesario viajar más rápido que la luz.



Agujeros negros conectados

Imaginemos dos observadores, Romeo y Julieta, uno en cada espacio exterior. Cada uno de ellos verá un horizonte de sucesos; es decir, un agujero negro. Aunque las regiones externas pertenecen a universos distintos, los dos agujeros negros comparten el interior, por lo que Romeo y Julieta podrían encontrarse allí.



Solución idealizada

La solución de Schwarzschild describe un caso de gran interés teórico, pero no se aplica a los agujeros negros del mundo real. Estos últimos se forman por el colapso de materia, lo que modifica la geometría de la solución. Un agujero negro astrofísico solo corresponde a una parte de la geometría de Schwarzschild; en particular, no contiene agujeros de gusano que conecten con otros espacios.

—su longitud se hace infinita— antes de que a un observador le dé tiempo a cruzarlo. Esto supone una decepción para los personajes de las películas de ciencia ficción, que suelen emplear los agujeros de gusano para cruzar el universo a velocidades superlumínicas.

En el caso de dos agujeros negros conectados a través de su interior por un agujero de gusano, los horizontes se tocan por un instante, pero luego se separan tan rápido que resulta imposible cruzar el puente y llegar al otro lado. De manera que, si Romeo tratase de enviar un mensaje superlumínico a Julieta, no podría. Lanzaría un cohete con el mensaje hacia su agujero negro y la nave caería en el interior. Pero, una vez dentro, los dos horizontes se separarían a toda velocidad y el espacio colapsaría mucho antes de que el mensaje pudiese llegar al horizonte de Julieta.

Sin embargo, Romeo y Julieta aún tendrían una oportunidad para verse. Podrían dejarse caer en sus respectivos agujeros

negros y encontrarse en el interior. Pero hay un problema: una vez dentro, jamás podrían salir, por lo que morirían en la singularidad. Se trataría literalmente de un caso de «atracción fatal». Lo extraño de esta geometría es que describe dos agujeros negros que comparten el interior. Por eso Romeo y Julieta pueden encontrarse allí.

Hemos de enfatizar que nuestros agujeros de gusano son muy distintos de los que aparecen en las películas de ciencia ficción. Estos últimos (aquellos que sí podrían atravesarse) requieren un tipo de materia con energía negativa que no parece ser compatible con las leyes de la física tal y como las conocemos. Por eso, muchos físicos creemos que los agujeros de gusano de la ciencia ficción no pueden existir en la naturaleza.

Otro matiz importante atañe a la clase de agujeros negros que estamos considerando aquí. Los agujeros negros que se forman por el colapso de materia solo corresponden a una porción de la geometría completa de Schwarzschild, ya que la presencia

de materia modifica la solución. Este caso se entiende muy bien y en él no hay ningún agujero de gusano. Los agujeros negros que se producen por medio de procesos astrofísicos naturales, como el colapso de estrellas, son de este tipo y no contienen agujeros de gusano que los conecten con otras regiones del espacio ni entre sí, como ocurre en la solución completa de Schwarzschild. Sin embargo, nos gustaría entender mejor la interpretación física del espacio-tiempo de Schwarzschild. Después de todo, se trata de una de las soluciones más sencillas de las ecuaciones de Einstein.

CORRELACIONES CUÁNTICAS

De manera sorprendente, la interpretación de la solución de Schwarzschild parece tener que ver con el otro artículo de Einstein que mencionábamos al principio. Este trabajo es hoy muy famoso e influyente. Fue escrito el mismo año junto con Rosen y Boris Podolski, también investigador del Instituto de Estudios Avanzados. Los autores (hoy conocidos por sus iniciales, EPR) mostraron que la mecánica cuántica permite la existencia de extrañas correlaciones entre sistemas físicos lejanos, una propiedad que más tarde sería llamada «entrelazamiento».

Las correlaciones entre objetos distantes también se dan en los sistemas clásicos. Imagine que usted sale de casa con un solo guante porque olvidó el otro en casa. Antes de mirar en su bolsillo, no podrá saber qué guante tomó. Pero, una vez lo haga y vea que tiene el guante derecho, sabrá de inmediato que el que está en su casa es el izquierdo.

Sin embargo, el entrelazamiento implica correlaciones entre variables cuánticas, las cuales pueden estar sujetas al principio de incertidumbre de Heisenberg. Este nos dice que hay pares de variables físicas que no pueden conocerse con total precisión al mismo tiempo. El ejemplo más famoso es el de la posición y la velocidad de una partícula: si medimos muy bien su posición, la velocidad se tornará incierta, y viceversa. En su artículo, EPR se preguntaron qué ocurriría si tenemos dos sistemas distantes y en cada uno de ellos decidimos medir un par de variables sujetas al principio de incertidumbre.

El ejemplo analizado por EPR consideraba dos partículas con la misma masa que se mueven en una sola dimensión. Llamemos a estas partículas R y J y preparémoslas de tal manera que su centro de masas tenga una posición bien definida, digamos $x_{cm} = x_R + x_J = 0$. También podemos hacer que su velocidad relativa, $v_{rel} = v_R - v_J$, tome un valor preciso; por ejemplo, $v_{rel} = v_0$. Antes de continuar, clarifiquemos algo. Aquí estamos especificando una posición y una velocidad de manera exacta. ¿No viola esto el principio de incertidumbre de Heisenberg? Recordemos que este se aplica a la posición de un sistema y a la velocidad asociada a dicha posición. Pero, si tenemos dos sistemas distintos, nada nos impide conocer la posición del primero y la velocidad del segundo. En nuestro ejemplo no estamos determinando la posición y la velocidad del centro de masas, sino la posición del centro de masas y la velocidad relativa de las partículas. Dado que ambas cantidades son independientes, no hay ningún problema en considerar un estado inicial como el que postularon EPR.

Ahora vayamos a la parte más sorprendente. Supongamos que nuestras partículas se encuentran muy alejadas una de otra y que dos observadores distantes, Romeo y Julieta, deciden medir sus posiciones. Ahora bien, debido a cómo han sido preparadas, si Julieta obtiene el valor x_J , entonces Romeo encontrará que su partícula está en $x_R = -x_J$. Por otro lado, si los dos miden la velocidad y Julieta obtiene el resultado v_J , Romeo

hallará con toda seguridad el valor $v_R = v_0 + v_J$. Por supuesto, Romeo y Julieta son libres de elegir qué variable van a medir. Sin embargo, si Julieta mide la posición y Romeo la velocidad, sus resultados serán completamente aleatorios y no mostrarán correlación alguna.

Lo extraño es que, si Julieta decide medir la posición de su partícula, la de Romeo tendrá una posición completamente determinada una vez que sepamos el resultado de la medición de Julieta. Y lo mismo ocurrirá con la velocidad. Podríamos pensar que, cuando Julieta mide la posición, la partícula de Romeo «sabe» inmediatamente que debe tener una posición bien definida. A primera vista esto parece constituir una transmisión instantánea de información: al repetir el mismo experimento un gran número de veces, Julieta podría enviar a Romeo un mensaje de ceros y unos decidiendo medir la posición o la velocidad de su partícula. Sin embargo, Romeo no sería capaz de leer ese mensaje a menos que conociese el resultado de las mediciones de Julieta. Así pues, las correlaciones debidas al entrelazamiento cuántico no pueden usarse para enviar señales superlumínicas.

El entrelazamiento tal vez parezca una propiedad muy esotérica de los sistemas cuánticos, pero a lo largo de los años ha sido confirmado en numerosos experimentos. En las últimas dos décadas, las correlaciones cuánticas han dado lugar a varias aplicaciones prácticas y a grandes avances en disciplinas como la criptografía y la información cuánticas.

ER = EPR

Ahora retornemos a los agujeros negros. En 1974, Stephen Hawking demostró que los efectos cuánticos causan que los agujeros negros emitan radiación del mismo modo en que lo hace un cuerpo caliente. Ello implica que los agujeros negros tienen asociada una temperatura. Dicha temperatura resulta ser mayor cuanto más pequeño es el objeto. De hecho, un agujero negro puede ser blanco. En concreto, uno del tamaño de una bacteria, con un radio similar a la longitud de onda de la luz visible, se vería blanco debido a la radiación de Hawking. No emitiría mucha luz, pero desde cerca lo veríamos como un pequeño punto brillante. Con todo, la masa de un agujero negro de ese tamaño seguiría siendo enorme, equiparable a la de un continente, por lo que no cabría usarlo como fuente de energía.

En los agujeros negros que se producen de forma natural por el colapso de estrellas, la radiación de Hawking es tan débil que, en la práctica, resulta inobservable. Estos objetos son demasiado grandes y se encuentran demasiado fríos para apreciar dicho efecto. Sin embargo, el hecho de que los agujeros negros tengan asociada una temperatura acarrea importantes consecuencias.

Sabemos desde el siglo XIX que la temperatura se debe al movimiento de los constituyentes microscópicos de un sistema. En un gas, por ejemplo, aparece como consecuencia de la agitación de sus moléculas. Por tanto, cabe esperar que un agujero negro cuente con algún tipo de constituyentes microscópicos capaces de adoptar un gran número de configuraciones posibles, o «microestados». También creemos que, al menos vistos desde el exterior, los agujeros negros deberían comportarse como sistemas cuánticos ordinarios sujetos a todas las leyes de la mecánica y la termodinámica.

En vista de lo anterior, nada nos impide considerar estados entrelazados de agujeros negros. Imaginemos un par de agujeros negros muy distantes, cada uno con un gran número de microestados. Podemos pensar en una configuración en la que cada microestado del primer agujero negro se halla correlacionado

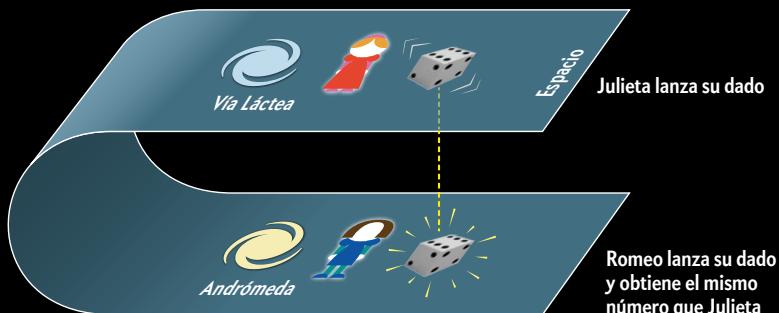
El pegamiento cuántico del espaciotiempo

Uno de los fenómenos menos intuitivos predichos por la mecánica cuántica es el entrelazamiento. En él, las medidas efectuadas sobre dos sistemas cuánticos distantes parecen coordinarse de manera instantánea (arriba). En 1935, Albert Einstein, Boris Podolsky y Nathan Rosen analizaron las implicaciones de este fenómeno en un artículo hoy célebre.

Varias investigaciones recientes han demostrado que el entrelazamiento cuántico puede originar una conexión geométrica entre regiones distantes del espacio (abajo). Este resultado sugiere un principio general en gravedad cuántica. El espaciotiempo podría emerger a partir de las correlaciones cuánticas de sus constituyentes microscópicos fundamentales.

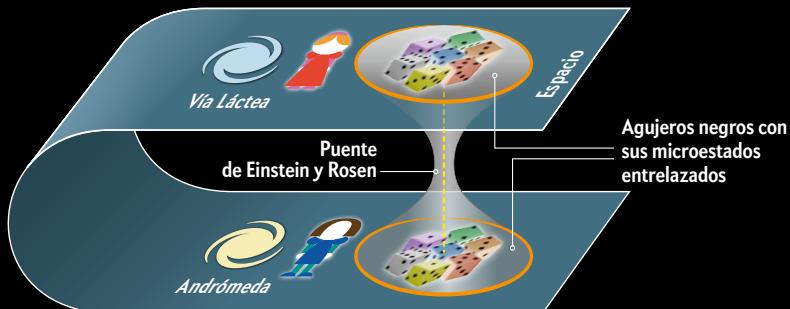
Entrelazamiento cuántico

Dos partículas entrelazadas pueden verse como dos dados que arrojan siempre el mismo resultado. Cada vez que Julieta lanza su dado obtendrá un número aleatorio. Sin embargo, su resultado estará correlacionado con el que obtenga Romeo. En contra de lo que podría parecer, el entrelazamiento no puede usarse para enviar información de manera instantánea.



Conexión geométrica

Romeo y Julieta podrían crear dos agujeros negros con partículas entrelazadas. Una vez formados, dichos agujeros negros quedarían conectados a través de su interior por un agujero de gusano, como ocurre en la solución completa de Schwarzschild. Ni Romeo ni Julieta podrían atravesar esa conexión geométrica para llegar al otro lado, pero sí podrían encontrarse en su interior.



con el correspondiente microestado del segundo. En concreto, si observamos el primer agujero negro en un microestado determinado, el segundo deberá encontrarse exactamente en el mismo microestado.

Lo interesante es que, a partir de ciertas consideraciones relacionadas con la teoría de cuerdas y las teorías cuánticas de campos, puede argumentarse que un par de agujeros negros con sus microestados entrelazados de esta manera —es decir, en un estado de tipo EPR— darían lugar a un espaciotiempo en el que un puente de ER une el interior de ambos agujeros negros. En otras palabras, el entrelazamiento cuántico origina una conexión geométrica entre los dos agujeros negros.

A esto lo hemos llamado equivalencia entre ER y EPR, o ER = EPR, ya que relaciona los dos artículos que Einstein y sus colaboradores escribieron en 1935. Desde el punto de vista de EPR, las observaciones realizadas cerca del horizonte de cada uno de los agujeros negros se hallan correlacionadas debido al entrelazamiento cuántico. Desde el punto de vista del puente de ER, las observaciones están correlacionadas porque la distancia entre ambos sistemas es pequeña a través del agujero de gusano. Para establecer esta equivalencia, es importante

que no podamos enviar información a través del agujero de gusano, ya que tampoco puede enviarse información usando el entrelazamiento.

Pensemos en un futuro muy lejano en el que dos familias enemistadas tratan de mantener a Romeo y Julieta separados. Mandan a Romeo a la galaxia de Andrómeda y retienen a Julieta en la Vía Láctea. Sin embargo, permiten que ambos se envíen mensajes y pares de sistemas cuánticos entrelazados. Esto les llevaría muchísimo tiempo, pero estamos en un futuro en el que la esperanza de vida es mucho mayor. Con paciencia, Romeo y Julieta podrían crear dos agujeros negros entrelazados. Dichos agujeros negros tendrían un aspecto normal vistos desde fuera, por lo que las familias nunca sospecharían nada. Sin embargo, una vez creados, Romeo y Julieta podrían dejarse caer en su interior y encontrarse allí por última vez antes de morir en la singularidad.

¿UN PRINCIPIO UNIVERSAL?

Las ideas que llevan hasta aquí han sido desarrolladas a través de los años por varios investigadores, comenzando por un estudio de 1976 de Werner Israel, de la Universidad de Alberta. Nuestro

trabajo con Susskind fue motivado por una paradoja planteada en 2012 por Ahmed Almheiri, Donald Marolf, Joseph Polchinski y James Sully, por aquella época todos en la Universidad de California en Santa Bárbara. En contra de lo que se pensaba hasta entonces, estos investigadores argumentaron que el entrelazamiento cuántico obligaba a reemplazar el horizonte de sucesos de un agujero negro (una superficie suave, según la teoría de Einstein) por una barrera impenetrable de alta energía [véase «Agujeros negros y muros de fuego», por Joseph Polchinski y «¿Fuego en el horizonte?», por Roberto Emparan; *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*, abril de 2015]. En el contexto de la relación ER = EPR, dicha paradoja parece poder resolverse.

La equivalencia ER = EPR sugiere que siempre que haya un entrelazamiento cuántico debería surgir una conexión geométrica. Esto se aplicaría incluso al caso más simple en el que solo tenemos dos partículas entrelazadas. En tales situaciones, sin embargo, la conexión espacial podría implicar estructuras diminutas y muy cuánticas, las cuales no se parecerían mucho a nuestra noción usual de geometría. Aunque aún no sabemos cómo describir estas geometrías microscópicas, la idea es que la relación ER = EPR proporcionaría un principio que toda teoría cuántica de la gravedad debería respetar. La teoría de gravedad cuántica más estudiada es la teoría de cuerdas. En ella, la relación ER = EPR puede justificarse de manera rigurosa en algunos casos en los que el entrelazamiento adopta una forma muy específica, pero todavía no existe un consenso sobre si dicha equivalencia se cumple en todos los casos.

Hemos visto que el entrelazamiento cuántico puede, literalmente, acercar dos sistemas distantes. También sabemos que dos regiones cercanas del espacio están entrelazadas. Parece

natural pensar que el espacio-tiempo, una estructura continua, surja a partir del entrelazamiento, una propiedad profundamente cuántica. Esta idea se encuentra hoy en el punto de mira de varios investigadores, pero aún no se ha sintetizado en una formulación precisa.

PARA SABER MÁS

Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der Einsteinschen Theorie. Karl Schwarzschild en *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften*, vol. 7, págs. 189-196, febrero de 1916. Traducción al inglés de S. Antoci y A. Loinger disponible en arxiv.org/abs/physics/9905030

Can the quantum mechanical description of physical reality be considered complete? Albert Einstein, Boris Podolsky y Nathan Rosen en *The Physical Review* vol. 47, págs. 777-780, mayo de 1935. Disponible en journals.aps.org/pr/pdf/10.1103/PhysRev.47.777

The particle problem in the general theory of relativity. Albert Einstein y Nathan Rosen en *The Physical Review*, vol. 48, págs. 73-77, julio de 1935.

Disponible en journals.aps.org/pr/pdf/10.1103/PhysRev.48.77

Cool horizons for entangled black holes. Juan Maldacena y Leonard Susskind en *Fortschritte der Physik*, vol. 61, pág. 781-811, septiembre de 2013. Disponible en arxiv.org/abs/1306.0533

Entanglement and the geometry of spacetime. Juan Maldacena en *The Institute for Advanced Study Newsletter*, otoño de 2013. Versión preliminar y más sintética de este artículo. Disponible en <https://www.ias.edu/about/publications/ias-letter/articles/2013-fall/maldacena-entanglement>

EN NUESTRO ARCHIVO

La mecánica cuántica de los agujeros negros. S. Hawking en *IyC*, marzo de 1977.

Teoría cuántica y realidad. B. d'Espagnat en *IyC*, enero de 1980.

El espacio, ¿una ilusión? J. M. Maldacena en *IyC*, enero de 2006.

SUSCRÍBETE a *Investigación y Ciencia...*



Ventajas para los suscriptores:

- **Envío puntual a domicilio**
- **Ahorro** sobre el precio de portada 75 € por un año (12 ejemplares) 140 € por dos años (24 ejemplares)
- **Acceso gratuito** a la edición digital (artículos en pdf)

... y recibe gratis 2 números de la colección TEMAS

www.investigacionyciencia.es/suscripciones

Teléfono 934 143 344