

Año 23 | N° 61 | diciembre 2016

ISSN papel: 1514-920X

ISSN en línea: 1853-2942

EXACTAMENTE

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales - UBA

EX
m

La revista de
divulgación
científica

/ Sexualidad y educación

De eso no se habla

/ Oceanografía

Investigaciones en el
fondo del Mar Austral

/ Dossier

50 años de la *Noche
de los bastones largos*

**La fábrica del
espacio-tiempo**



Una lupa sobre el espacio-tiempo

Adivinanza: ¿qué tienen en común dos fotones –en la jerga de la mecánica cuántica– entrelazados y dos rincones del universo muy distantes entre sí pero conectados por un agujero de gusano? Respuesta: la fábrica del espacio-tiempo.

Guillermo Mattei - gmattei@df.uba.ar

Para Newton, el espacio y el tiempo eran un mero escenario. Para Einstein, el espacio-tiempo de la Teoría Especial de la Relatividad era un sofisticado entramado de cuatro dimensiones que incluía, como caso particular, a la pintura newtoniana. Para Einstein, el espacio-tiempo de la Teoría General de la Relatividad develaba la precisa naturaleza de la gravedad teniendo en cuenta a las masas y a la energía presentes en el Universo. La Relatividad General es la mejor explicación que los cosmólogos tienen del Universo y en ella el espacio-tiempo no es una entelequia sino un modo de la realidad, una entidad concreta, un objeto físico y, como tal, tiene un origen, una estructura, una materialidad. A cien años de la Teoría General de la Relatividad los físicos empiezan a olfatear cuál es la esencia íntima del espacio-tiempo. Los detalles.

La conexión Dalí-Seurat

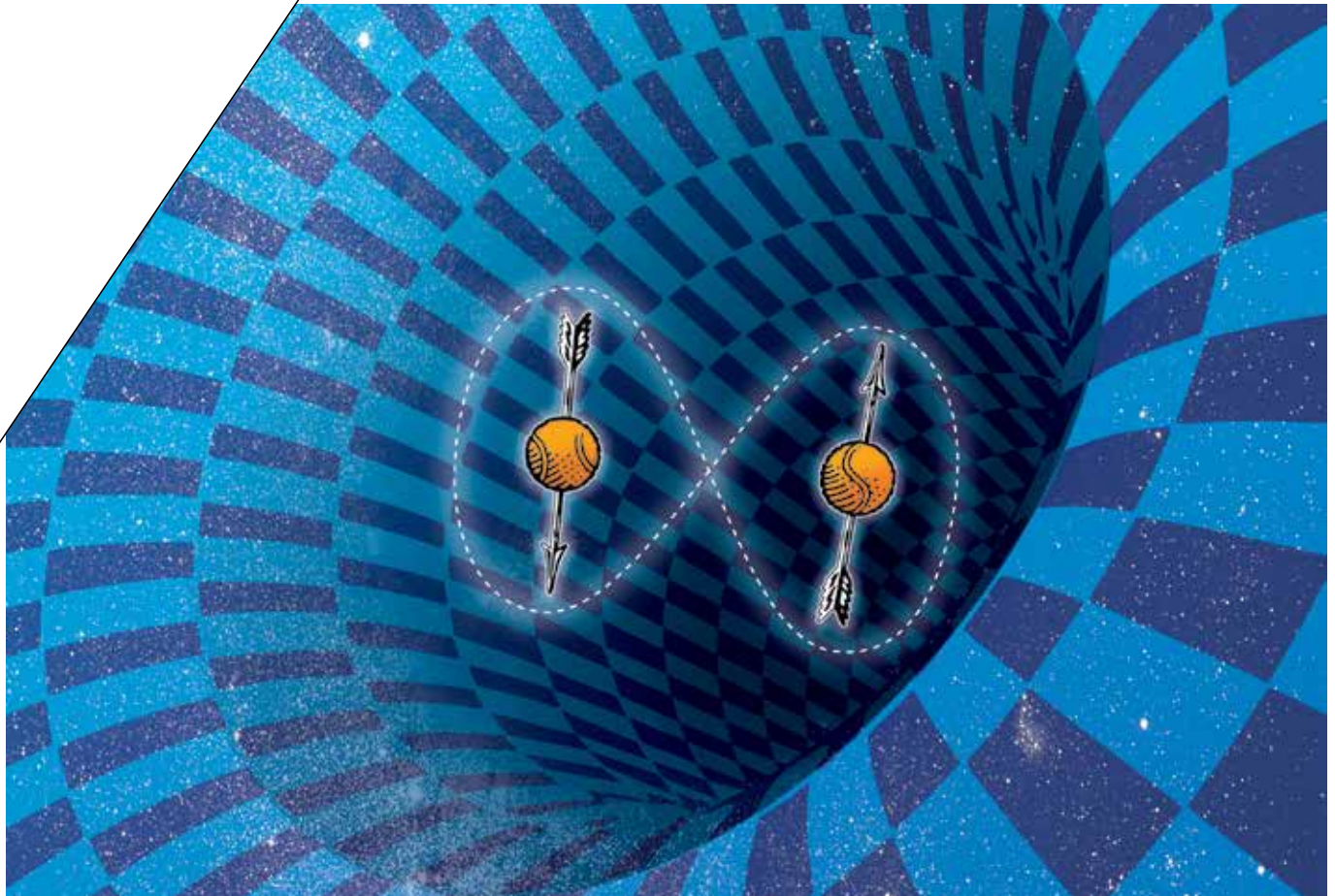
Los principales aportes de Einstein a la física se cuentan con los dedos de las manos. Algunos son temáticamente próximos, otros no tanto. Algunos se divulgaron más y mejor, otros no tanto. Pero todos son extraordinariamente trascendentes. La Teoría General de la Relatividad (TGR) y la llamada Paradoja de Einstein, Podolsky y Rosen (EPR), son dos ejemplos de esa gloriosa lista.

La TGR es obviamente el aporte más colosal. Sin embargo, la no tan popular EPR es uno de los pilares conceptuales en los que se basan las ramas de la física conocidas como fundamentos de la mecánica cuántica, información cuántica y computación cuántica. Nada más y nada menos. Es decir, Einstein aportó ideas liminares tanto a la descripción del universo a gran escala como a la del mundo subatómico. Sin duda, dos pinturas bien diferentes.

La periodista y comunicadora estadounidense K. C. Cole lo describe muy bien

en el blog *Quanta Magazine*: “El espacio-tiempo de la Relatividad General es suave, curvado, armónico y determinista, así como una pintura de Dalí. Las partículas cuánticas del mundo subatómico ocupan el espacio como en un lienzo puntillista, discreto y probabilístico, así como una pintura de Seurat”. Tesis y antítesis pictóricas. Sin embargo, recientes especulaciones, conjeturas, cálculos y aproximaciones en los bordes del conocimiento físico sugerirían que algunas de las propiedades de las partículas cuánticas serían la base sobre la que se asienta la naturaleza material del espacio-tiempo de la TGR.

Por un lado, ciertas soluciones de las ecuaciones de campo de la TGR predicen una suerte de atajos en el tejido del espacio-tiempo, por ejemplo entre dos agujeros negros, llamados agujeros de gusano o puentes de Einstein-Rosen (ER) (ver EXACTAMENTE #30). En la película *Contacto* de 1997 –con la dirección de Robert Zemeckis, el guión del recordado Carl Sagan, el asesoramiento del prestigioso astrofísico Kip Thorne y



la actuación de Jody Foster— la protagonista, la doctora Eleanor “Ellie” Arroway, viaja por un agujero de gusano a un planeta remoto de la estrella Vega.

Por otro lado, la EPR prescribe la existencia de, al decir de Einstein, una “fantasmagórica” influencia a distancia entre las partículas subatómicas, llamada entrelazamiento cuántico, que hoy se mide y controla en muchos laboratorios. Algo así como una inseparabilidad intrínseca de un conjunto de partículas cuánticas que no pueden identificarse como partículas individuales con estados definidos, sino solo como un sistema entrelazado.

Pero ¿puede haber alguna relación entre estos dos mundos de escalas tan disímiles? El famoso físico de teoría de cuerdas, Leonard Susskind (Universidad de Stanford, Estados Unidos) sostiene que “el entrelazamiento cuántico podría representar la conectividad que cose a toda la estructura espaciotemporal”.

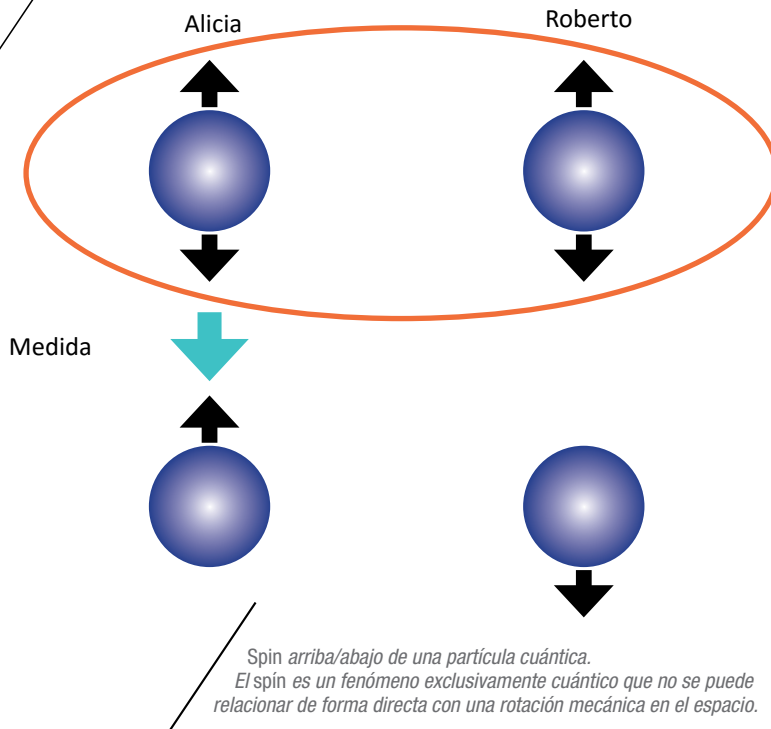
Larga vida y prosperidad al Señor Spock

En 2010, el profesor de la Universidad Británica de Columbia (Estados Unidos) Mark Van Raamsdonk introdujo, no sin generar polémica en la comunidad física, la hipótesis de conectar la idea de los agujeros de gusano con la del entrelazamiento cuántico. “El espacio-tiempo es solo una imagen geométrica de cómo la materia está entrelazada en el régimen cuántico”, afirmó Van Raamsdonk.

“Sin esas conexiones, todo el espacio-tiempo se atomizaría”, argumenta un viejo y famoso ex alumno de Exactas-UBA y del Instituto Balseiro: el argentino Juan Martín Maldacena (Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, Estados Unidos). Maldacena, luego de dar a conocer su proeza matemática de 1997 aplicada a la teoría de cuerdas y a la rama del conocimiento llamada materia condensada, pasó a ser un gurú de la comunidad de la física teórica que viene, en las últimas décadas, intentando —sin éxito aún— ubicar

en un mismo esquema conceptual a la Mecánica Cuántica y a la TGR. Tan es así que, de hecho, Susskind llama a Maldacena “El Maestro” y confiesa: “Un día Juan me pasó un mensaje muy críptico, ‘ER=EPR’. ¡Yo capté de inmediato qué era lo que tenía entre manos El Maestro! Así, desde el 2013, empezamos a pensar juntos en entrelazamientos y agujeros de gusano”. La historia de Exactas corrobora los dichos de Susskind: el joven alumno Maldacena había sido rebautizado, a fines de la década de 1980, por sus docentes de laboratorio como el Señor Spock por su estilo críptico, austero e infalible.

La semiótica de ER=EPR parecería indicar lo siguiente: si dos partículas están conectadas por un entrelazamiento, entonces efectivamente están unidas por un agujero de gusano. Contrariamente, la conexión que los físicos llaman agujero de gusano es equivalente a un entrelazamiento. O sea, dos modos diferentes de describir una misma realidad subyacente. Escenas con alto contenido de física explícita.



De volúmenes y de sus fronteras

El famoso trabajo de Maldacena puede bosquejarse, de alguna manera, como la sofisticadísima relación matemática entre dos mundos idealizados muy diferentes. Uno es “parecido” al que vivimos actualmente los humanos, salvo por el hecho de que no se expande aceleradamente (el nuestro, sí), tiene frontera (el nuestro, no), tiene tres dimensiones (el nuestro, cuatro), está lleno de partículas cuánticas y obedece a las reglas de la gravedad de la TGR. Este mundo tiene nombre propio: espacio de anti de Sitter (AdS) –en honor al físico holandés Willem de Sitter, contemporáneo de Einstein y coprotagonista de muchos aspectos de la historia de la TGR– o, sintéticamente el volumen interior. El otro mundo también contiene a todas las partículas elementales de la materia, tiene una dimensión menos, no incluye a la gravedad, responde a ciertas ecuaciones de la Mecánica Cuántica y es conocido como “la frontera”.

La frontera es una membrana que envuelve al volumen tal como la superficie de una pelota de fútbol encierra al aire interior. El punto singular de este modelo teórico es que la frontera está

ubicada a una distancia infinita del volumen interior, tal como ocurre en el dibujo de Escher llamado *Círculo Límite IV* en el cual los ángeles y los demonios se encogen infinitamente hacia el perímetro, pero sin alcanzarlo nunca.

Maldacena descubrió –sofisticados y complejos detalles matemáticos mediante– que esta clase de volumen y esta clase de frontera son completamente equivalentes. De manera similar a los hologramas o imágenes 3D a partir de la información en una placa fotográfica 2D, las ecuaciones que prescindieren de la gravedad en la frontera permiten extraer información de la compleja física de la gravedad adentro del volumen.

“¡Milagro, milagro!” exclamó Van Raamsdonk cuando descubrió este novedoso recurso, y agregó: “La dualidad de Maldacena nos dio a los físicos una manera de pensar a la gravedad cuántica en el volumen sin pensar para nada en la gravedad: solo tenemos que mirar el estado cuántico equivalente en la frontera”. El desafío era contestar la pregunta: “¿cómo hace exactamente un campo cuántico en la frontera para crear gravedad en el volumen?” Es ahí donde la sospecha recayó en la

posible relación entre la geometría y el entrelazamiento.

Pese a que todo lo estudiado al respecto hasta ese momento se centraba en volúmenes que incluían agujeros negros, Van Raamsdonk logró generalizar el modelo demostrando que el entrelazamiento es el ingrediente esencial que amalgama el espacio-tiempo de una manera suave y continua.

La computadora cuántica

Juan Pablo Paz, profesor del Departamento de Física de Exactas-UBA, investigador y director del Instituto de Física de Buenos Aires (CONICET-UBA) e Investigador de la Nación 2014, es un experto de primera línea mundial en computación cuántica. Paz refiere: “En 1994, el matemático Peter Shor (Bell Labs, Estados Unidos) desató un gran revuelo. Demostró que si fuéramos capaces de construir computadoras cuánticas podríamos resolver eficientemente algunos problemas matemáticos, como el de descomponer un número entero como producto de números primos, cuya solución es muy difícil para las computadoras usuales porque demanda invertir recursos que crecen exponencialmente con el tamaño del número a factorizar. Más adelante, en 1996, Shor dio un paso decisivo en el camino para construir una computadora cuántica. Demostró que la información cuántica puede ser protegida del medio ambiente que la rodea y que de otro modo se perdería irremediablemente.

En las computadoras cuánticas la información está guardada en bits cuánticos o qubits que, a diferencia de los bits de las computadoras digitales, no solamente pueden tomar valores 0 y 1, sino que pueden ocupar estas dos alternativas a la vez. Los qubits están representados por estados físicos tales como el espín arriba o abajo de un electrón (ver Figura 2). Cuando los qubits interactúan y se entrelazan de la manera correcta, el dispositivo podría hacer cálculos que a una computadora usual le demandaría un tiempo de cómputo equivalente a toda la edad del universo. Sin embargo, en la práctica, este procedimiento es singularmente frágil. Cualquier



Archivo Exactas Comunicación

Juan Martín Maldacena

pequeña perturbación o “ruido” desde el mundo exterior rompería el delicado entrelazamiento del qubit y abortaría la posibilidad de semejante cálculo.

“Shor mostró que para proteger el qubit podían usarse los denominados códigos cuánticos de corrección de errores. Para eso, es necesario almacenar el estado del qubit a proteger usando muchos portadores físicos, que deben ser preparados en un estado entrelazado apropiadamente elegido. De ese modo la información está distribuida de manera

esparcida –no local, en la jerga– y es inmune a alteraciones inducidas por el ruido, que afecten a cada uno de los portadores por separado”, explica Paz.

“En los últimos dos años han surgido sorprendentes conexiones entre los célebres trabajos de Shor y los de Maldacena que, vistos a la distancia, podría decirse que fueron contemporáneos. El propio Maldacena abrió el camino para encontrar conexiones, pero luego siguieron otros que lo iluminaron aún más. En una serie de trabajos recientes se ha demostrado que si las partículas de la frontera son preparadas en estados entrelazados como los usados para codificar la información cuántica, entonces en el volumen interior no solamente hay un qubit representado, que es robusto y resistente a perturbaciones sino que también, en algún sentido, determina la estructura del espacio-tiempo interior. El entrelazamiento en la superficie parece influir en la estructura íntima del espacio y el tiempo en el interior”, detalla Paz.

En suma, la correspondencia frontera-volumen de Maldacena exhibe la misma no localidad de los códigos cuánticos de corrección de errores: la información correspondiente a una región pequeña de la materia se esparce sobre una

gran región en la frontera. John Preskill, investigador del Instituto Tecnológico de Pasadena, Estados Unidos y autor, con el joven físico argentino Fernando Pastawski (Instituto Tecnológico de California, Estados Unidos), de uno de los trabajos más influyentes en este tema afirma: “La dualidad de Maldacena es en sí misma un código cuántico de corrección de errores”.

Espacio-tiempo: estás rodeado.

Si bien la exitosa correspondencia frontera-volumen desarrollada no se aplica al mundo en el que realmente vivimos los *Homo sapiens*, hay confianza en que algunas de estas propiedades sean más generales y trascendentes. Paz opina: “Estos son grandes avances de hoy, que a la luz del paso del tiempo serán probablemente vistos como pequeños pasos en una búsqueda, tal vez en la dirección correcta, para resolver un problema fundamental”.

Más allá de los resultados estimulantes y de los desafíos pendientes, la conjetura “El espacio-tiempo está hecho de entrelazamientos” parecería tener muchas chances de demostrarse verdadera en un futuro próximo. //

HUMOR por Daniel Paz

Aquel día en la playa, el comentario de su esposa hizo que Einstein tomara conciencia de la relación entre Tiempo y Gravedad

