

La paradoja de la pérdida de información en agujeros negros

Carmen A Núñez
Instituto de Astronomía y Física
del Espacio (IAFE) CONICET

Los agujeros negros son objetos muy interesantes en astrofísica pero también constituyen un escenario natural para abordar algunas cuestiones de principio de la física fundamental. En este artículo se describe la paradoja de la pérdida de información que aparece al estudiar aspectos cuánticos de los agujeros negros y se discute cómo esta pone en evidencia la inconsistencia lógica entre los dos pilares básicos de la física contemporánea: la relatividad general y la mecánica cuántica. Se presenta también la solución que propone la teoría de cuerdas.

La paradoja de la pérdida de información en los agujeros negros, que se origina al estudiar qué es lo que le sucede a la información que está escondida dentro de un agujero negro, podría resumirse en la pregunta: esta información ¿se destruye y se pierde para siempre o se puede recuperar con la radiación emitida a medida que el agujero negro se evapora?

Esta cuestión fue originalmente tratada por Stephen Hawking en 1974 en un trabajo muy importante donde mostró que el proceso de evaporación de los agujeros negros contradecía los principios de la física cuántica.

Con esta observación, precipitó una crisis fundamental en la física básica: parecía que había que sacrificar al menos uno de los dos pilares fundamentales sobre los que se asienta la física moderna, la relatividad general y la mecánica cuántica. La relatividad general, la teoría de la interacción gravitatoria formulada por Albert Einstein, es el marco teórico que nos permite entender el universo a grandes escalas: estrellas, galaxias, cúmulos y supercúmulos de galaxias. La mecánica cuántica, en cambio, es un marco teórico para entender el universo a las escalas más pequeñas: moléculas, átomos y toda la gama de partículas subatómicas como electrones, fotones y quarks. A lo largo de los años, los físicos han confirmado experimentalmente, con una precisión asombrosa, casi todas las predicciones realizadas por estas dos teorías. Pero el trabajo de Hawking conduce inexorablemente a una conclusión preocupante: la relatividad general y la mecánica cuántica no pueden ser ambas correctas, al menos cuando se aplican a los agujeros negros. Las dos teorías que sustentan el enorme progreso de la física del último siglo parecen ser incompatibles.

En la mayoría de los casos, excepto en situaciones muy extremas, los físicos estudian cosas que son muy pequeñas y livianas (como los átomos y sus componentes) o cosas que son enormes y muy pesadas (como las estrellas o galaxias), pero no ambas a la vez. Esto significa que solo es necesario usar la mecánica cuántica o la relatividad general, pero no las dos juntas. Los dominios de aplicación de estas dos teorías son en general muy diferentes y en la mayoría de los casos una de ellas nos permite entender el fenómeno que estudiamos sin necesidad de apelar a la otra.

Pero el universo presenta algunas situaciones extremas. En un agujero negro hay una enorme masa comprimida en un tamaño minúsculo. Cerca de la singularidad, en el modelo del big bang, todo el universo observable estaba concentrado en una región microscópica. Estos escenarios son diminutos

y a la vez extremadamente masivos, de manera que requieren que ambas teorías, la mecánica cuántica y la relatividad general, actúen simultáneamente. Las ecuaciones de la relatividad general y la mecánica cuántica, cuando se tratan de combinar, no encajan. Preguntas físicas bien formuladas provocan respuestas sin sentido, ilógicas, cuando requieren la unificación de estas dos teorías. Si uno quiere entender los agujeros negros o los primeros instantes del universo, debe admitir esta hostilidad y desarrollar una nueva teoría que permita unificar estas dos en un nivel más profundo de comprensión.

La sugerencia radical de Hawking en 1974 fue que había que modificar los fundamentos de la mecánica cuántica.

Agujeros negros en el universo

Empecemos recordando que un agujero negro es un lugar donde la gravedad es tan intensa que la velocidad necesaria para escapar de ella es mayor que la velocidad de la luz. Laplace, en el siglo XVIII, sugirió que podrían existir objetos con estas características; pero en el siglo XX, Einstein modificó las ideas vigentes acerca de la gravitación y, en consecuencia, de la descripción de los agujeros negros.

Forma parte de nuestra vida cotidiana el hecho de que todo lo que tiramos hacia arriba vuelve a caer. Y todos sabemos que esto se debe a la atracción gravitatoria de la Tierra. Imaginemos que tiramos una pelota hacia arriba. Cuanto más fuerte lo hagamos, más rápido se aleja de nuestra mano y más alto llega antes de volver a caer. Pero si la tiramos lo suficientemente fuerte, si le damos una velocidad inicial cada vez mayor, llegará un momento en el que no volverá. La atracción gravitatoria no podrá hacerla regresar. La velocidad mínima que debe tener la pelota para escapar de la atracción de la Tierra se llama velocidad de escape, y es de unos 11,2 km/seg (un poco más de 40.000 km/h) sobre la superficie de la Tierra. Si le damos a la pelota una velocidad igual o mayor que la velocidad de escape, la enviaremos al espacio y no volverá a caer.

La velocidad de escape depende de la masa de la Tierra y de su tamaño. Si imaginamos un planeta muy masivo y muy pequeño, con mucha materia concentrada en un pequeño volumen, la atracción gravitatoria aumenta y entonces la velocidad de escape se hace mayor. Habrá que lanzar las pelotas más fuerte que en la Tierra para que puedan escapar. En algunos casos, será necesaria una velocidad mayor a 300.000 km/seg. Esta es la velocidad de la luz, la mayor velocidad que se puede alcanzar según

la teoría de la relatividad especial de Einstein. En esta situación nada puede escapar ya que nada puede viajar más rápido que la luz. Este objeto que no permite que nada escape de él es un agujero negro.

El tamaño del agujero negro depende de su masa. Un agujero negro con la masa del Sol tendrá un radio de 3 km (mientras que el Sol tiene unos 700.000 kilómetros de radio); si la masa es la de la Tierra, el agujero negro tendrá un radio de 1 cm (en lugar de los 6370 km del radio terrestre); nuestro radio de agujero negro (es decir, un agujero negro con la masa de un ser humano) es más pequeño que cualquier distancia de las que podemos medir actualmente.

Como la luz no puede escapar de un agujero negro es imposible ver a este directamente. Pero hay muchos indicios de que realmente existen.

Los agujeros negros se pueden formar en procesos astrofísicos. Algunas estrellas muy masivas terminan sus días colapsando en agujeros negros. Cuando una estrella terminó de quemar su combustible nuclear, las fuerzas gravitatorias superan la presión de la radiación y no se puede evitar el colapso. La estrella finalmente se contrae hasta que se transforma en un agujero negro. La masa de estas estrellas y de los agujeros negros que resultan al final de su evolución es de unos pocos soles (entre 5 y 100 masas solares) y el tamaño del agujero negro es de unos 10 km de radio.

Hay agujeros negros con masas intermedias, entre 500 y 1000 masas solares, que han sido descubiertos recientemente. Y, finalmente, también hay evidencias de agujeros negros en el centro de algunas galaxias que son mucho más masivos, con masas miles de millones de veces la masa del Sol y tamaños del orden del sistema solar (radios de aproximadamente 3×10^9 km). En nuestra galaxia parece haber evidencias, por radiación X, de un agujero negro en el centro con una masa de 2,6 millones de soles.

¿En qué forma se los detecta? En principio podríamos verlos por el modo en que deflecan la luz, por un efecto conocido como lente gravitacional. La luz se curva al pasar cerca de un objeto muy masivo y en consecuencia se forman imágenes múltiples del objeto que está detrás del agujero negro. En la práctica, estos agujeros negros están rodeados por el gas de un disco de acreción. Este gas se calienta de un modo característico y los astrónomos ven la radiación que viene de ese gas caliente.

Los agujeros negros son objetos muy interesantes en astrofísica. Pero no vamos a tratar ese aspecto en este artículo. Vamos a considerar cómo los agujeros negros permiten investigar cuestiones de principio de la física fundamental; cómo se manifiesta en los agujeros negros la contradicción entre

la mecánica cuántica y la relatividad general que mencionamos al comienzo.

Agujeros negros en relatividad general

En 1905, Einstein modificó las nociones de espacio y de tiempo absolutos de Newton para resolver una paradoja: la velocidad de propagación de la luz es independiente del movimiento del observador. En su teoría de la relatividad especial introdujo el concepto de *espacio-tiempo*, según el cual el tiempo debe considerarse en un pie de igualdad con las dimensiones espaciales. Una consecuencia de esto es que el tiempo transcurre de manera diferente según la velocidad del observador. Un reloj que se aleja a gran velocidad de nosotros atrasa respecto del nuestro. El efecto sólo es apreciable para velocidades relativas cercanas a la de la luz, es decir que no lo observamos a velocidades ordinarias. Pero se verifica experimentalmente en los aceleradores de partículas, donde partículas inestables que se aceleran a velocidades cercanas a la de la luz decaen mucho más lentamente (es decir, tienen una vida media mayor).

En 1915, Einstein trató de encajar la gravedad en esta nueva visión del espacio y el tiempo. Tenía para ello algunos indicios, como el notable descubrimiento de Galileo sobre el movimiento de cuerpos pequeños debido a la gravedad, que resulta ser independiente de la naturaleza de los cuerpos. Esto le sugirió que la gravedad podría ser una propiedad del propio espacio-tiempo. En lugar de la imagen newtoniana de la gravitación como una atracción entre todos los cuerpos masivos, la relatividad general describe la gravitación como un efecto de la curvatura del espacio-tiempo producida por la distribución de materia. Así el Sol curva el espacio-tiempo y la Tierra se mueve a lo largo de una trayectoria que es la línea de menor longitud en esa geometría curva.

La gravedad también cambia el modo en que transcurre el tiempo. De acuerdo con la teoría de Einstein, como el campo gravitatorio es más intenso cerca de la superficie terrestre, el tiempo transcurrirá más lentamente en la planta baja de un edificio, donde la atracción gravitatoria es mayor, que en el piso superior. El efecto es muy pequeño a escala terrestre: una parte en 10^{15} . Pero es importante en objetos más masivos.

Para un observador que está lejos de una masa muy pesada el tiempo transcurre más rápido que para un observador cercano. La relación entre el intervalo de tiempo que transcurre entre dos tics de

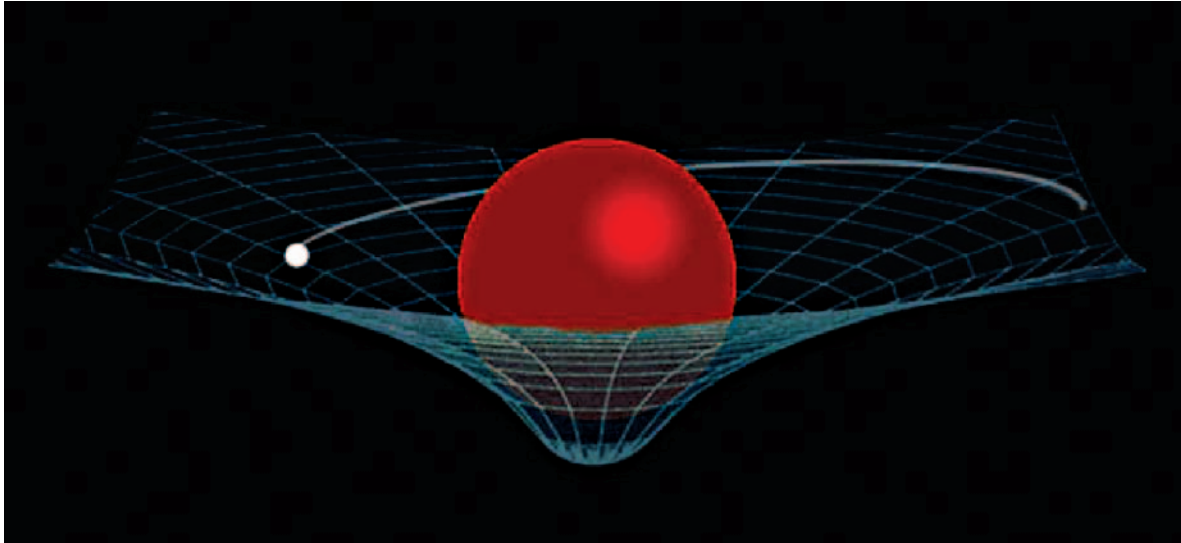


Figura 1. El Sol curva el espacio-tiempo y la Tierra describe la trayectoria de menor longitud en esa geometría.

un reloj a cierta distancia de un cuerpo masivo y en otra posición infinitamente alejada se llama factor de corrimiento al rojo.

En la superficie de la Tierra este factor es muy pequeño, aproximadamente 10^{-10} ; en la superficie del Sol es cerca de 10^{-6} ; en la superficie de una estrella de neutrones es de 0,7. La superficie donde el tiempo se detiene, es decir donde el intervalo entre tics se hace infinito, se llama horizonte de eventos y es lo que denominamos el radio del agujero negro (lo indicaremos como r_h). Si uno lo cruza no siente nada especial, pero no puede volver a salir. La luz puede atravesarlo hacia adentro pero no hacia afuera, no puede escapar del agujero negro. Por eso la superficie del agujero negro se llama horizonte: es el límite de lo que pueden ver los observadores que están afuera del agujero negro. El tamaño del horizonte depende de la masa (r_h es directamente proporcional a la masa del agujero negro). Una vez que uno cruzó el horizonte, sigue cayendo hacia adentro y termina irremediabilmente en una singularidad. Esta es una región de curvatura muy grande del espacio-tiempo, donde una persona que se acercara se desgarraría. Las distintas partes de su cuerpo estarían sometidas a fuerzas tan intensas que terminaría despedazado. Las propias nociones de espacio y de tiempo deben reformularse en las regiones cercanas a una singularidad.

Cuando se forma un agujero negro se desarrolla esta singularidad, que es una región de curvatura infinita. Y ahí fallan las teorías; no podemos describir una singularidad con las teorías físicas actuales. Pero esta región está rodeada por el horizonte, la

superficie imaginaria que separa el interior del exterior del agujero negro, de manera tal que algo en el interior nunca podrá escapar hacia el exterior. De acuerdo con la teoría de Einstein, la presencia de un horizonte implica que nunca se verá la singularidad y que, independientemente de lo que pase adentro, nada escapará hacia afuera.

La relatividad general predice también que la forma final de un agujero negro, tal como se ve desde afuera, es independiente del modo en que se formó. Las únicas propiedades que conserva de todo el proceso de formación son la masa, y eventualmente si está cargado y rota, la carga y el momento angular. Este hecho se conoce como el *teorema de no pelos*, es decir que los agujeros

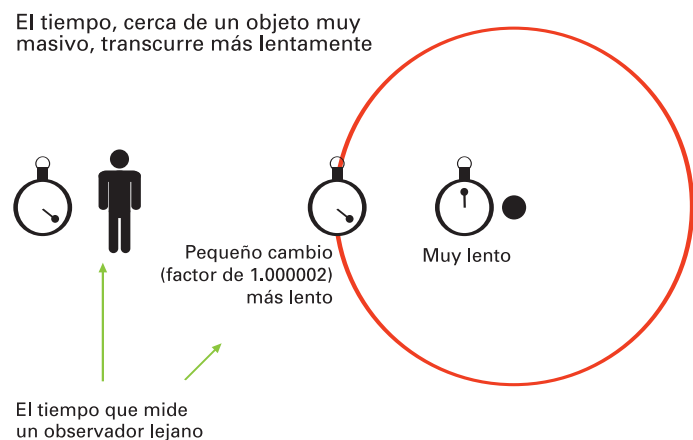


Figura 2. El tiempo transcurre más lentamente cerca de un objeto masivo.

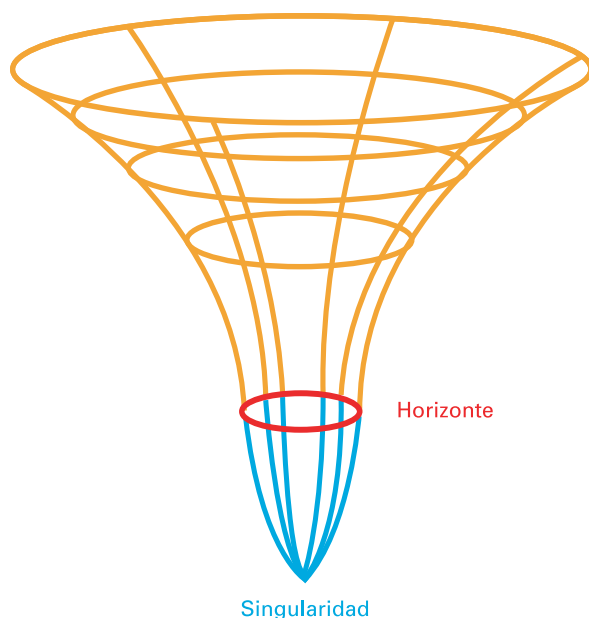


Figura 3. Dentro de un agujero negro hay una singularidad, donde la materia tiene densidad infinita y la fuerza de la gravedad es infinitamente grande. Esta singularidad está separada del exterior por un horizonte de eventos que impide verla desde afuera.

negros no tienen pelos (o tienen a lo sumo tres pelos). Aunque un agujero negro es un objeto macroscópico, en relatividad general tiene una descripción bastante simple.

Radiación térmica

Si bien en relatividad general un agujero negro es un objeto del que nada puede escapar, por efectos cuánticos puede emitir radiación. Efectivamente, Hawking mostró en 1974 que los agujeros negros no son negros en realidad. Tienen una temperatura característica que se origina en procesos cuánticos. Para entender este efecto conviene recordar que las consecuencias de un campo gravitatorio son como las de la aceleración. Esta equivalencia entre aceleración y gravedad es lo que Einstein llamó el *principio de equivalencia*: si uno está en una habitación sin ventanas y no tiene contacto con el exterior, es imposible decir si la habitación está en reposo sobre la superficie de la Tierra o si está lejos en el espacio pero acelerándose de forma igual pero en sentido opuesto a aquella con la que vemos caer los objetos en la Tierra.

Consideremos una persona en el espacio vacío. No hay materia ni radiación. Esta persona está equipada con instrumentos científicos: detectores de partículas y termómetros. Antes de encender los

motores de su nave espacial no ve nada porque está en una región verdaderamente vacía. Al prender los motores experimentará el efecto normal de la aceleración: se sentirá más pesada, como si estuviera de repente en un campo gravitatorio.

Pero la aceleración tiene otro efecto que en principio parece no estar relacionado con la gravedad: en cuanto se aceleran, los detectores de partículas del cosmonauta empiezan a registrar, a pesar de que, según un observador normal que no esté acelerando, el espacio en el que se mueve está vacío. Los observadores que no se aceleran ven un espacio completamente vacío. El observador acelerado ve el espacio lleno de partículas. Estas partículas son una consecuencia de su aceleración.

Más interesante todavía es lo que vería si mirara su termómetro. Antes de empezar a acelerar este marcaría el cero absoluto porque la temperatura es una medida de la energía de movimiento de las partículas, y el cosmonauta está en el espacio vacío. Pero al acelerar, el termómetro registra una temperatura. Esta temperatura es proporcional a la aceleración. Todos los instrumentos se comportarán como si estuvieran inmersos en un gas de partículas, a una temperatura que aumenta proporcionalmente a su aceleración.

Este efecto no se ha observado todavía. Es una predicción hecha en 1970 por el físico canadiense Bill Unruh, quien calculó la relación exacta entre la temperatura (T) y la aceleración (a): $T = a / (h/2\pi c)$. En esta fórmula, h es la constante de Planck e indica que esta temperatura tiene un origen cuántico. Y c es la velocidad de la luz, 300.000 km/seg.

La constante de proporcionalidad entre la temperatura y la aceleración es tan chica que el efecto no se ha podido medir experimentalmente todavía. Pero no es inaccesible y hay algunas propuestas para medirlo en los próximos años. En un mundo clásico, sin cuántica, la constante de Planck sería cero y no habría efecto. El efecto también desaparecería si la velocidad de la luz fuera infinita, y por lo tanto también se anularía en una física newtoniana. Usando el principio de equivalencia entre la aceleración y la gravedad, la temperatura en la superficie de la Tierra debida a este efecto es extremadamente pequeña: 10^{-20} K.

Hawking calculó que en el exterior de un agujero negro se mediría una temperatura inversamente proporcional a su masa. La constante de proporcionalidad es muy pequeña y en consecuencia los agujeros negros de masas estelares tienen temperaturas de unas pocas fracciones de grado. Son mucho más fríos que los 2,7 K de la radiación cósmica de fondo que inunda el universo. Pero un agujero negro con masa mucho menor sería mucho más caliente, incluso siendo de menor tamaño.

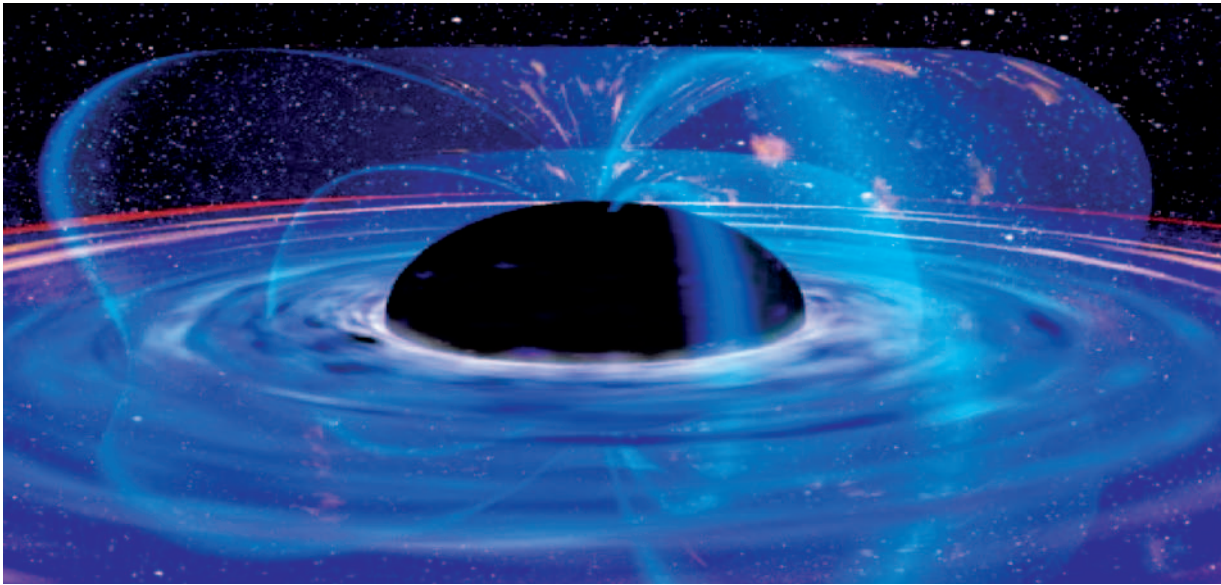


Figura 4. **Energía escapando de un agujero negro.**

Efectivamente, en 1974 Hawking predijo que los agujeros negros emiten radiación térmica. Los agujeros negros más pequeños tienen una temperatura más alta (ya que la temperatura es inversamente proporcional a la masa y en consecuencia a r_h). Por ejemplo, los agujeros negros con la masa del Sol ($M_S \sim 2 \times 10^{30}$ kg), tienen una temperatura de radiación de unos $3,6 \times 10^{-7}$ K; si la masa es la de la Tierra ($M_T \sim 6 \times 10^{24}$ kg), $T \sim 0,1$ K y para la masa de una

montaña de unos 10^{18} kg la temperatura de la radiación térmica es de unos 7000 K, es decir, estos micro-agujeros negros se verían como una estrella.

¿Cuál es el origen de la temperatura detectada por un observador acelerado? La temperatura es energía. Si el termómetro mide debe haber una fuente de energía y esta viene de los motores de la nave del observador, que son el origen de su aceleración. Por el principio de equivalencia, en el caso de los

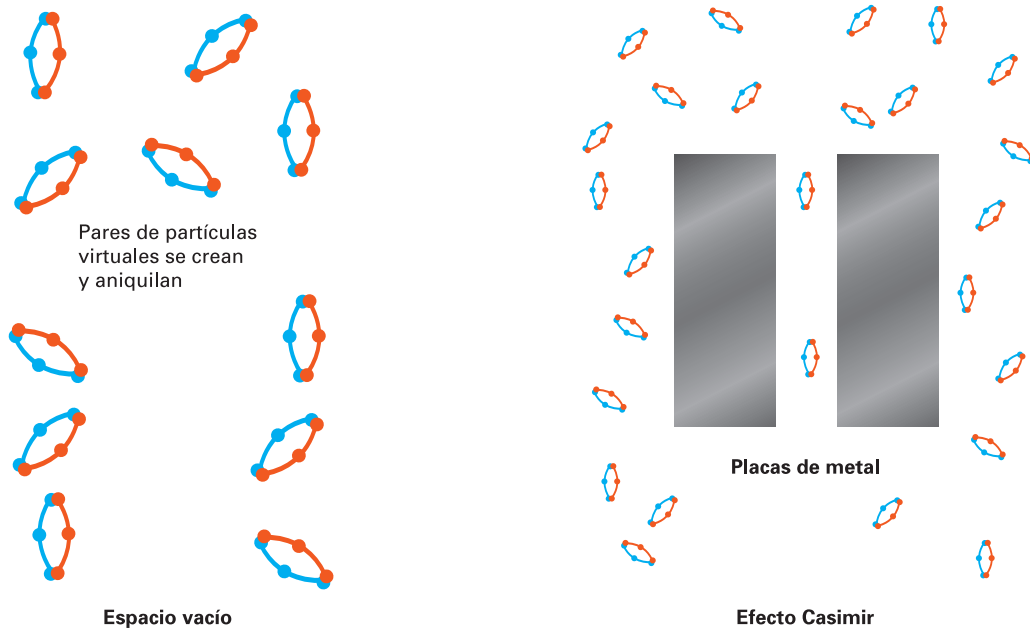


Figura 5. **Pares de partículas virtuales se crean y destruyen permanentemente en el vacío. El efecto Casimir permite detectarlas mediante la atracción entre placas paralelas.**

agujeros negros esa energía debe originarse en el propio campo gravitatorio. Y la fuente de este campo es la masa. Por lo tanto la energía responsable de la temperatura del agujero negro proviene de su masa.

Pero la temperatura no solo es energía. Es energía en movimiento aleatorio. Y para entender por qué es aleatorio el movimiento de las partículas que detecta el observador acelerado o de las que crea el campo gravitatorio del agujero negro hay que entender otros principios básicos de la mecánica cuántica.

El vacío, por ejemplo, es un estado muy poco intuitivo en mecánica cuántica. Hay pares de partícula-antipartícula que se crean continuamente y luego se aniquilan. Aun en un vacío perfecto, se crean y destruyen constantemente pares de partículas virtuales. Por ejemplo, un fotón puede decaer en un par electrón-positrón y luego el electrón y el positrón se aniquilan creando un nuevo fotón. Aunque no podemos verlas, sabemos que estas partículas virtuales están realmente en el espacio vacío porque dejan algunas trazas detectables. Un efecto de los fotones virtuales es producir un pequeño corrimiento en los niveles de energía de los átomos, que ha sido medido con gran precisión. Otra manifestación de estas partículas virtuales es el efecto Casimir. Este efecto es una atracción que se observa entre dos placas paralelas de metal descargadas y se debe a que se pueden crear menos partículas virtuales entre las placas que en el espacio que las rodea y por lo tanto se genera una presión de afuera hacia adentro que acerca a las placas.

El principio de indeterminación de Heisenberg permite explicar que estas partículas virtuales existan por períodos de tiempo cortos aun cuando no haya suficiente energía para crearlas. Se crean por incertezas en la energía. Se podría decir que toman prestada la energía necesaria para su creación y luego rápidamente la devuelven y desaparecen. Típicamente estos cuantos virtuales se pueden separar cierta distancia antes de recombinarse y aniquilarse.

El proceso por el cual el observador acelerado detecta partículas calientes y los agujeros negros adquieren temperatura es esta creación de pares virtuales partícula-antipartícula por efectos cuánticos. En algunos casos es posible separar el par usando energía externa para evitar la aniquilación, y entonces las partículas virtuales se convierten en reales. Por ejemplo, supongamos que el par partícula-antipartícula se forma justo en el horizonte del agujero negro. Si un miembro del par cae dentro del agujero negro el observador que está afuera no puede ver la aniquilación del par y debe interpretar el cuanto que ve como una partícula real. Lo mismo le sucede al observador acelerado en el espacio vacío, que también tiene un horizonte, una región oculta del universo a la que no tiene acceso. La antipartícula, digamos, cae detrás de

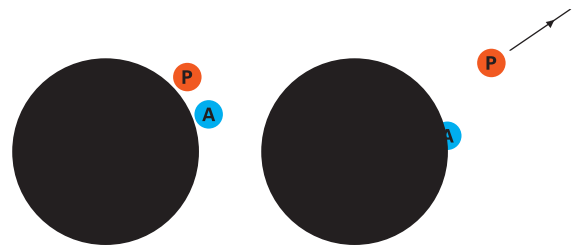


Figura 6. Un par partícula-antipartícula virtual que se forma cerca del horizonte de un agujero negro puede dar lugar a partículas reales debido a la geometría del espacio-tiempo.

su horizonte y el detector mide la partícula que quedó en su región accesible del universo, como se ve en la figura 6.

Las propiedades de los miembros del par partícula-antipartícula están correlacionadas de manera que una descripción completa de uno de ellos requiere necesariamente un conocimiento del otro. Cada partícula que detecta el observador acelerado está correlacionada con la antipartícula que está del otro lado del horizonte. Esto implica que parte de la información necesaria para hacer una descripción completa de las partículas que forman la radiación de los agujeros negros es inaccesible porque está en la antipartícula que cayó en la región oculta, detrás del horizonte. En consecuencia, lo que se observa es intrínsecamente aleatorio, no hay forma de predecir exactamente cómo se comportarán las partículas. Pero movimiento aleatorio es, por definición, calor. Entonces, las partículas detectadas por el observador acelerado o por el que está afuera del agujero negro se ven calientes.

Las propiedades térmicas de los agujeros negros entonces mezclan la mecánica cuántica con la relatividad general. Es muy difícil mezclar estas teorías. Si se intenta hacerlo aparecen problemas. Y es en este contexto que surge la paradoja de la pérdida de información de los agujeros negros o paradoja de Hawking. Veamos en qué consiste.

Evaporación del agujero negro

La radiación emitida por un agujero negro, llamada radiación de Hawking, se lleva energía. Y esto implica que un agujero negro en el espacio vacío debe perder masa, porque no hay otra fuente de energía que compense la radiación que emite. El proceso por el cual un agujero negro pierde su masa por radiación se llama *evaporación del agujero negro*. A medida que un agujero negro emite radiación, su masa disminuye. Pero como su temperatura es inversamente proporcional a su masa, a

medida que pierde masa se calienta. Se hace más y más pequeño y más y más caliente. Se va evaporando. Parecería que llegará un momento en que no le quedará más masa y desaparecerá.

La evaporación de un agujero negro astrofísico es un proceso muy lento. La velocidad de evaporación, que depende de la temperatura, es muy lenta porque la propia temperatura es muy baja inicialmente. Un agujero negro de la masa del Sol demoraría unas 10^{60} veces la edad actual del universo en evaporarse. Pero un agujero negro de unos 10^{12} kg tiene una vida comparable a la edad del universo, es decir que podríamos observar el proceso de evaporación de estos agujeros negros si se formaron durante los primeros instantes de la vida del universo. Entonces, si tenemos suficiente paciencia, el agujero negro microscópico se tornará muy caliente, se evaporará cada vez más rápido, se hará más y más pequeño, más y más caliente. Nada puede impedir que convierta toda su masa en radiación y desaparezca completamente.

Y esto nos coloca frente a la paradoja de la pérdida de información. La pregunta sobre qué sucede al final de la evaporación del agujero negro es lo que conduce a la paradoja de Hawking: ¿Qué sucede con la información atrapada dentro del agujero negro?

El proceso de evaporación continúa hasta que la temperatura es tan alta que cada fotón emitido tiene una energía muy grande llamada energía de Planck. En ese momento la masa del agujero negro es casi como la masa de Planck, unos 2×10^{-5} g y su horizonte es de unas pocas longitudes de Planck (10^{-33} cm). Estas unidades de Planck definen el régimen donde los efectos cuánticos de la gravedad se hacen importantes. ¿Qué sucede a estas temperaturas, a estas distancias? ¿Cómo evoluciona después el agujero negro? ¿Cómo termina su vida, si es que termina? Esto solo podrá responderlo una teoría de la gravedad cuántica. El agujero negro, ¿desaparecerá completamente? ¿O comenzarán a jugar otros aspectos, impredecibles por ahora, mientras no tengamos esa teoría de la gravedad cuántica?

La escala de Planck que acabamos de mencionar es muy interesante. A estas distancias deberíamos observar los cuantos elementales que forman el espacio y el tiempo. Por otro lado, para observar distancias tan pequeñas necesitaríamos energías muy grandes. Consecuentemente, la energía de Planck es enorme (10^{19} GeV) y la temperatura correspondiente es solo comparable a la alcanzada durante las etapas más tempranas de nuestro universo. A estas energías tan grandes, mucho mayores que cualquier energía que podemos alcanzar en los laboratorios terrestres o incluso que podemos observar en los procesos astrofísicos más energéti-

cos, las propias nociones de espacio y de tiempo de Einstein podrían no ser válidas. Para poder entender la física a estas escalas es necesaria una teoría de la gravedad cuántica. Pero si intentamos aplicar las reglas de la mecánica cuántica a la relatividad general, de manera análoga a como se aplican en otros procesos (por ejemplo a los electrones y fotones) aparecen problemas de consistencia matemática en las ecuaciones, los cálculos dan resultados infinitos que no tienen sentido y surgen paradojas físicas como las que plantea la evaporación de los agujeros negros.

Antes de explicar en qué consiste la paradoja, todavía es necesario definir los conceptos de entropía e información en la física cuántica.

Entropía de los agujeros negros

La cantidad de aleatoriedad que hay en un sistema caliente se llama *entropía*. Es decir, la entropía es una medida de cuánto desorden o aleatoriedad hay en el movimiento de los átomos de un sistema caliente.

En un sistema aleatorio, como un gas a cierta temperatura, hay una gran cantidad de entropía en el movimiento aleatorio de las moléculas. Esta entropía es información sobre las posiciones y movimientos de las moléculas que no queda especificada cuando se describe el gas en términos de cantidades como densidad y temperatura. Estas cantidades se promedian sobre todos los átomos en el gas, así que cuando uno habla de un gas en estos términos la mayoría de la información sobre las posiciones y movimientos reales de las moléculas se desprecia. La entropía de un gas es una medida de esta falta de información. En una descripción macroscópica la entropía es proporcional a la energía de las moléculas del gas e inversamente proporcional a su temperatura.

La información sobre los estados exactos de las partículas calientes que ve el observador acelerado no es completa porque está codificada en los estados de las partículas de su región inaccesible (detrás del horizonte). Como la aleatoriedad es resultado de la presencia de una región oculta, la entropía debería estar relacionada con el tamaño del mundo que no puede ver el observador acelerado o el observador que está afuera del agujero negro. Es decir, la entropía debería tener que ver con el tamaño de la región inaccesible al observador. En realidad resulta ser una medida del tamaño de la frontera que lo separa de su región oculta. Además, el cambio en la entropía del agujero negro es la cantidad de energía que emitió o absorbió dividida por su temperatura. Sabemos expresar la energía del agujero negro en términos de su tamaño (la energía es directamente

proporcional a la masa o a r_h), y también sabemos que su temperatura es inversamente proporcional a la masa. Entonces podemos encontrar la dependencia de la entropía del agujero negro con su tamaño. En efecto, siendo la entropía proporcional al cociente entre energía y la temperatura, resulta ser proporcional al cuadrado de r_h . Esta relación entre el área del horizonte y la entropía fue descubierta en 1970 por un estudiante de doctorado: Jacob Bekenstein. Bekenstein y Unruh trabajaban bajo la supervisión de John Wheeler, quien un año antes había dado su nombre a los agujeros negros.

Para agujeros negros simples, que no rotan y no tienen carga eléctrica, los valores de la temperatura y la entropía se pueden expresar entonces de manera muy sencilla. La entropía S es proporcional al área (A), más precisamente: $S = A/4hG$. Es decir, la entropía es $1/4$ del área del horizonte de eventos del agujero negro dividido por la unidad de área de Planck (hG). La unidad de área de Planck es el cuadrado de la longitud de Planck: 10^{-66} cm^2 . En consecuencia, la entropía de un agujero negro es enorme: para un agujero negro de la masa del Sol, la entropía es aproximadamente 10^{78} . Este número es muy grande (la entropía del Sol es unos 20 órdenes de magnitud menor).

Pero hay una gran contradicción en lo que hemos dicho hasta ahora. Por un lado, cuando describimos a los agujeros negros en relatividad general dijimos que son objetos muy simples, con muy poca estructura. Independientemente de cómo se formaron, los agujeros negros se pueden caracterizar muy simplemente, es decir sus propiedades físicas se pueden describir completamente especificando solo su masa (y eventualmente su carga y momento angular). Por otro lado, acabamos de decir que los agujeros negros tienen una enorme entropía y una gran entropía indica gran complejidad. La cantidad de movimiento aleatorio, impredecible, es muy grande. Entonces ¿los agujeros negros son simples o son complejos?

¿De dónde proviene la entropía? Uno de los grandes logros de la mecánica cuántica fue explicar el origen microscópico del comportamiento termodinámico de los sistemas macroscópicos. Las propiedades termodinámicas de los gases se pueden entender en términos de estados cuantizados de la energía de sus átomos y moléculas. Entonces, ¿cuál es la física microscópica que explica las propiedades termodinámicas de los agujeros negros?

Cada molécula de un gas, como partícula cuántica, tiene estados de energía cuantizados; y para un gas, se pueden contar los microestados accesibles a esas moléculas. La entropía es el logaritmo de ese número. En física estadística cuántica, una gran

entropía se asocia con un gran número de estados cuánticos accesibles en los que el sistema puede fluctuar en equilibrio térmico.

¿Qué son todos estos grados de libertad cuánticos microscópicos del agujero negro que dan origen a esta entropía? ¿Qué son estas partículas que se están moviendo aleatoriamente y originan el calor y la entropía del agujero negro? Necesitamos una teoría cuántica de los agujeros negros que nos revele qué es su entropía, que nos dé una interpretación de la entropía en términos de estados microscópicos del agujero negro.

Los agujeros negros en relatividad general son independientes de qué los forma y de cómo se forman. Sus propiedades térmicas dependen de la gravedad y de la mecánica cuántica. Por lo tanto el origen de su entropía debería ser explicado por una teoría de la gravedad cuántica. A grandes rasgos, intuimos que la entropía del agujero negro debería venir del movimiento de los cuantos del espacio-tiempo, de las partículas elementales que forman el espacio-tiempo. Y para saber qué son estos cuantos necesitamos una teoría de la gravedad cuántica. Se piensa hoy que entender estos aspectos térmicos de los agujeros negros permitirá aprender mucho sobre la estructura cuántica del espacio y el tiempo.

Información en mecánica cuántica y la paradoja de Hawking

Otro aspecto de la mecánica cuántica relevante para esta discusión es que la información no se puede destruir.

Supongamos que codificamos la información que hay en una enciclopedia en bits, así como una computadora almacena la información, en secuencias de ceros y unos. Si escaneamos la enciclopedia y guardamos la información en la computadora, al día siguiente podremos leerla sin inconvenientes en principio. Pero en mecánica cuántica la evolución temporal de un sistema lo hace cada vez más complicado. Los distintos bits de información están correlacionados y evolucionan con el tiempo de manera que no se puede conocer el estado de cada uno de ellos sin tener un conocimiento completo de todos. De manera que si queremos leer una enciclopedia cuántica al día siguiente de haberla codificado necesitamos una enorme cantidad de información. Esto no significa que no podamos leerla, que la información se destruye. Solo que se hace más y más difícil reconstruirla a medida que pasa el tiempo. Pero la información no se destruye. Esta es una premisa básica de la mecánica cuántica que se verifica experimentalmente en todos los procesos conocidos hasta el momento.

Aunque los procesos físicos pueden transformar la información contenida en un sistema y hacerla inaccesible en la práctica, en principio la información siempre se debe poder recuperar. Una analogía de esta afirmación sería: Si quemamos la Enciclopedia Británica o la Enciclopedia de la Real Academia Española, las llamas y las cenizas serán muy parecidas en los dos casos, pero en realidad hay diferencias sutiles: con suficiente inteligencia y tecnología avanzada debería ser posible descifrar el contenido de la enciclopedia observando las llamas y las cenizas.

Ahora estamos en condiciones de apreciar la paradoja de Hawking. Supongamos que tenemos una enciclopedia con gran cantidad de información. Imaginemos que los bits de información que codifican el contenido de la enciclopedia forman un gas que colapsa por la fuerza de la gravedad y forman un agujero negro. Según la relatividad general, el agujero negro formado por la Enciclopedia Británica o la Enciclopedia de la Real Academia Española, serán exactamente iguales si las dos enciclopedias tienen la misma masa. Se dice que el agujero negro no tiene pelos.

Estos agujeros negros (llamémoslos británico y español) empiezan a emitir radiación. Según Hawking esta radiación no tiene absolutamente ninguna información sobre la enciclopedia que dio origen al agujero negro. En efecto, parte de la información que necesitamos para reconstruir la enciclopedia está detrás del horizonte, fuera de cualquier contacto causal con el exterior. No hay ningún problema con esto porque en realidad solo estamos mirando una parte del sistema completo. La radiación no lleva información porque parte del sistema es inaccesible, está detrás del horizonte. Pero supongamos que esperamos pacientemente hasta que el agujero negro haya emitido la mayor parte de su masa. En algún momento el agujero negro se evaporará completamente, el horizonte de eventos desaparecerá y ya no podremos decir que la información que falta está detrás del horizonte. La información que estaba codificada en los bits adentro del agujero negro se pierde inevitablemente, cae en la singularidad y ninguna medición que podamos hacer en la radiación que quedó nos permitirá recuperar esa información. En la jerga física se dice que un estado cuántico puro, con mucha información (toda la información contenida en la enciclopedia, por ejemplo) ha evolucionado hacia un estado mezcla, con gran cantidad de información faltante (la radiación térmica que emitió el agujero negro).

Esta es la paradoja de la pérdida de información. Es una paradoja en el sentido de que hemos seguido los principios básicos de la relatividad

general y la mecánica cuántica hasta el final y hemos concluido que un estado puro evoluciona a un estado mezcla, lo cual viola los principios de la mecánica cuántica.

Es decir, podemos formar un agujero negro de muy distintas maneras, pero siempre se evapora de la misma forma, aunque los principios de la mecánica cuántica implican que debería haber una descripción precisa de los agujeros negros y que no todos los agujeros negros deberían evaporarse dejando los mismos residuos, indistinguibles unos de otros. Debería haber diferencias sutiles en lo que queda cuando el agujero negro se evaporó, según cómo se formó. Si los agujeros negros respetaran las leyes de la mecánica cuántica, entonces si un agujero negro se forma a partir de una enciclopedia, eventualmente deberíamos ser capaces, en principio, de leer la enciclopedia observando cuidadosamente la luz emitida cuando el agujero negro se evaporó.

Pero Hawking mostró que la evaporación del agujero negro es un fenómeno diferente de los procesos físicos ordinarios; la información que cae detrás del horizonte de eventos de un agujero negro se perderá para siempre, permaneciendo oculta aún después de que el agujero negro se evaporó completamente y desapareció. La contradicción entre la mecánica cuántica, que implica que necesitamos la información, y la relatividad general, que implica que no la podemos tener porque desapareció en una singularidad, se denomina la paradoja de la pérdida de información.

Durante cerca de 30 años Hawking dijo que los agujeros negros pueden destruir información cuántica. Como vimos, este tipo de destrucción de información viola los principios de la mecánica cuántica. Por lo tanto Hawking sugirió que esta teoría debía ser abandonada o por lo menos modificada. Esa era una postura revolucionaria: proponía abandonar una teoría que ha sido verificada experimentalmente con una precisión impresionante.

Pero en julio de 2004 Hawking presentó esquemáticamente un argumento que, según dijo, sustenta la conclusión de que no hay pérdida de información. Muchos físicos todavía adhieren a la posición anterior de Hawking y no están conformes con su cambio de opinión. Otros nunca aceptaron la propuesta original de modificar la mecánica cuántica. Pero todavía no hay consenso sobre la resolución de la paradoja.

Teoría de cuerdas

Para concluir con una visión más optimista del problema, presentamos muy esquemáticamente las

nuevas ideas sobre este tema que surgieron en los últimos años en el contexto de las teorías de cuerdas. En efecto, parece haber una posible solución a los problemas asociados con la física de los agujeros negros en el marco de la teoría de cuerdas o teoría M. En particular, Juan Martín Maldacena, un joven argentino que ha realizado aportes importantísimos en esta área, ha demostrado que en el marco de esa teoría ciertos agujeros negros preservan la información de una manera muy sutil.

La teoría de cuerdas surgió en la década de 1970 para explicar las interacciones fuertes. Actualmente está todavía en construcción, no se conocen aun los principios que la sustentan, pero se sabe que proporciona una descripción unificada de todas las interacciones. Se basa en la suposición de que los elementos básicos de la naturaleza son objetos unidimensionales, cuerdas. Una cuerda oscila cuando viaja en el espacio-tiempo y esas oscilaciones son el origen de las partículas que observamos a bajas energías. El gravitón, la partícula que transmite la interacción gravitatoria, es uno de los modos de oscilación de una cuerda cerrada. Otras partículas son cuerdas que oscilan de una manera diferente o son excitaciones de una cuerda abierta.

Estas cuerdas interactúan uniéndose y dividiéndose, y los cálculos que describen estos procesos dan respuestas finitas razonables. Como todavía no se han observado, estas cuerdas deben ser más pequeñas que la distancia más corta que se ha medido: aproximadamente unos 10^{-18} m.

Vimos que la relatividad general relaciona la curvatura del espacio-tiempo con la distribución de materia y energía. Pero ¿cómo aparecen las ecuaciones de Einstein en la teoría de cuerdas?

Las coordenadas de una cuerda en el espacio-tiempo curvo sienten la curvatura. Para que la propagación de la cuerda sea consistente con la mecánica cuántica, el espacio curvo en el que se propaga la cuerda debe ser una solución de las ecuaciones de Einstein con correcciones. Es decir, la teoría de cuerdas no predice las ecuaciones de Einstein exactamente, les agrega una serie infinita de correcciones. En circunstancias normales, si solo miramos escalas de distancia mucho más grandes que la escala de la cuerda, esas correcciones no son medibles. Y en ese caso las ecuaciones admiten soluciones de agujeros negros.

Pero a medida que la escala de distancias se hace más pequeña, las correcciones se hacen más grandes hasta que las ecuaciones de Einstein ya no describen el resultado adecuadamente. Cuando los términos de corrección se hacen grandes, no hay geometría del espacio-tiempo que pueda describir el resultado. Las ecuaciones que determinan la geo-

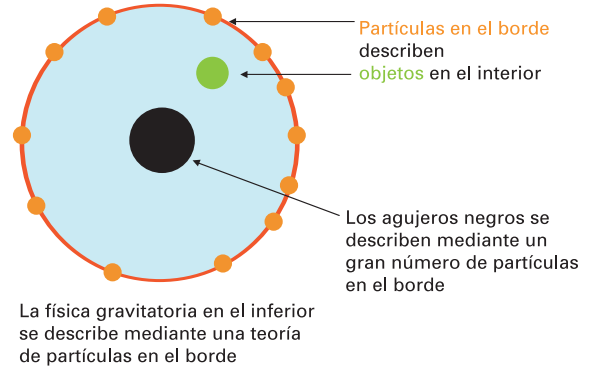


Figura 7. Según la conjetura de Maldacena, objetos complicados en un espacio de Anti de Sitter se pueden describir mediante teorías más sencillas en la frontera.

metría del espacio-tiempo se hacen imposibles de resolver excepto para condiciones muy particulares. Esta es una indicación de que tal vez la geometría del espacio-tiempo no es algo fundamental en la teoría de cuerdas, sino algo que emerge en la teoría a escalas de distancia grandes.

Agujeros negros y branas en teoría de cuerdas

En teoría de cuerdas hay relaciones de *dualidad* según las cuales a pequeñas distancias o cuando las fuerzas se hacen muy intensas, hay una descripción alternativa del mismo sistema físico que es muy diferente. Estas simetrías de dualidad permitieron descubrir que las teorías de cuerdas no solo contienen cuerdas sino también objetos de mayor dimensionalidad, llamados D-branas. Por ejemplo, una partícula puntual es una cero-brana, las cuerdas son 1-branas, las membranas son 2-branas, etc.

Los agujeros negros de una teoría de cuerdas son una colección de cuerdas en una región muy pequeña del espacio. Se pueden describir alternativamente como un conjunto de D-branas en la representación dual de la teoría, donde es posible calcular el número de estados cuánticos accesibles al sistema. Cuando consideramos las dos representaciones duales del agujero negro, se encuentra que la entropía calculada contando microestados en el sistema de D-branas coincide con $1/4$ del área del agujero negro de la descripción dual. En esta descripción las D-branas son los cuantos fundamentales de un agujero negro.

Estos cálculos fueron realizados originalmente por A Strominger y C Vafa en 1996 para algunos agujeros negros muy particulares (con una carga igual a su

masa en unidades adecuadas). Más tarde la equivalencia se verificó para otros agujeros negros algo más generales. Pero aunque el resultado es muy alentador, todavía es un desafío encontrar la descripción equivalente para cualquier agujero negro.

Holografía

La relación entre la entropía y el área del agujero negro es muy interesante. Es un ejemplo del holograma óptico usual en el cual una superficie bidimensional codifica información sobre la forma tridimensional de un objeto. Una idea parecida fue propuesta hace ya algunos años por G 't Hooft y L Susskind, que sugirieron que el número de grados de libertad que describen una región en una teoría de gravedad es proporcional al área de esa región.

Maldacena encontró una realización explícita de esta propuesta en la teoría de cuerdas. Pudo describir el interior de un espacio-tiempo particular (llamado Anti-de Sitter) en términos de una teoría en la frontera de ese espacio-tiempo, que tiene una dimensión menos. Según esta idea, las partículas que viven en el borde del espacio-tiempo describen un objeto que está en el interior. Los agujeros negros en el interior se describen mediante un gran número de partículas en el borde. La física gravitatoria en el interior, cuando resulta muy complicada, se puede describir de manera alternativa mediante partículas interactuantes en el borde. La teoría de la frontera es una teoría de partículas relativamente sencilla. Entonces, hay dos descripciones equivalentes de la misma física. Cuando una de ellas resulta incapaz de resolver un problema, se apela a la otra, que permite abordar las preguntas sin respuesta en la primera formulación. Una teoría de partículas relativamente sencilla en el borde puede describir objetos muy complicados del interior.

El espacio-tiempo emerge dinámicamente en este esquema, a partir de la interacción de las partículas que viven en la frontera. Y en esta formulación no hay pérdida de información porque la teoría cuántica de las partículas del borde es una teoría *unitaria* que respeta los postulados de la mecánica cuántica.

Conclusiones

Podemos afirmar que los agujeros negros son objetos fascinantes en los cuales los efectos de la curvatura del espacio-tiempo nos colocan frente a

situaciones límite, en las que se hace necesario desarrollar nuevas teorías, nuevas ideas.

Los agujeros negros combinados con la mecánica cuántica representan un gran desafío para nuestra comprensión del espacio-tiempo. La teoría de cuerdas es capaz de unificar aspectos clásicos y cuánticos de los agujeros negros y en esta formulación no hay pérdida de información. La descripción microscópica de la entropía del agujero negro en términos de D-branas o la representación holográfica de estos objetos en términos de partículas en la frontera del espacio-tiempo, constituyen maneras nuevas y muy interesantes de describir el espacio-tiempo.

CH



Carmen A Núñez

Doctora en Astronomía, Universidad Nacional de La Plata.

Profesora Adjunta, Departamento de Física, UBA. Investigadora Independiente, CONICET.

www.iafe.uba.ar/relatividad/carmen.html

Lecturas sugeridas

MALDACENA JM, 'Agujeros negros, cuerdas y gravedad cuántica', www.sns.ias.edu/~malda/PublicLectures.htm

NÚÑEZ C, 2004, '¿Qué es la teoría M?', *Ciencia Hoy*, 80:14-27

PRESKILL J, 'Black holes and information: a crisis in quantum physics', en www.theory.caltech.edu/people/preskill/

SMOLIN L, 2001, *Three roads to Quantum gravity*, Basic Books.

