

Los agujeros negros y la estructura del espacio-tiempo

Juan Maldacena

Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey 08540, EEUU

Resumen

La relatividad general predice la existencia de agujeros negros, que son objetos muy interesantes y enigmáticos. Describiremos algunas de sus propiedades clásicas más interesantes. Una vez que combinamos la relatividad general con la mecánica cuántica, los agujeros negros dejan de ser completamente negros. En realidad, emiten radiación térmica. La existencia de esta radiación térmica plantea paradojas. Utilizando la teoría de cuerdas, como una teoría de gravedad cuántica, se pueden resolver algunas de esas paradojas. Esto nos lleva a algunos cambios interesantes en nuestra concepción del espacio y del tiempo.

Agujeros Negros

Los agujeros negros son unos de los más fascinantes objetos que la teoría de la relatividad general de Einstein predice. Los agujeros negros tienen una historia interesante y han dado origen a muchas sorpresas teóricas que han conducido a una mejor comprensión de la naturaleza del espacio-tiempo.

Consideremos primero la teoría de la gravedad de Newton. Acá, sobre la superficie de la Tierra, podemos sentir la atracción de la gravedad. Si arrojamos una piedra hacia arriba, la misma cae debido a la fuerza de la gravedad. Podríamos arrojar un objeto en forma tal de que no cayera? Sí. Si lo arrojamos con una velocidad mayor a 11 km/s, entonces el mismo escaparía al campo gravitatorio de la Tierra. Esta "velocidad de escape" depende de la masa y del radio de la Tierra. Si la Tierra fuera más masiva y tuviera el mismo radio, entonces la velocidad de escape sería más alta. Luego, uno puede preguntarse: Qué sucedería si tuviéramos un objeto que fuera tan denso y tan masivo que la velocidad de escape fuera más rápida que la velocidad de la luz? Entonces parecería negro; la luz no podría escapar de él. Vamos a dar algunos ejemplos. Para que un objeto con la masa de la Tierra se convierta en un agujero negro, tendría que ser más pequeño que un centímetro. Un objeto con la masa del sol debería concentrarse en una región más pequeña que un kilómetro. Esto fue señalado en el siglo 19 por P. Laplace, pero nadie le prestó mucha atención.

Con la llegada de la teoría de la relatividad especial en 1905, aprendimos que la velocidad de la luz no es igual a cualquier otra velocidad: es el límite cósmico de la velocidad: nada puede viajar más rápido que la luz.

La teoría de la relatividad de Einstein también nos dice que el tiempo y el espacio están íntimamente conectados. El tiempo transcurre en forma diferente para los observadores que se mueven en forma relativa uno respecto de otro. Supongan que estamos en una avenida, parados en una esquina, y delante nuestro vemos dos semáforos, en dos calles distintas, que se ponen rojos al mismo tiempo. Para alguien que va en un automóvil los semáforos no se pondrían rojos al mismo tiempo. Esto es, por supuesto, después de tener en cuenta el tiempo que le lleva a la luz llegar a los ojos de ambos observadores. Ambos ven la luz viajando a la misma velocidad, pero ven transcurrir el tiempo en forma diferente. El tiempo es relativo, la velocidad de la luz es absoluta. Esto parece estar en contra de nuestra intuición, ya que nosotros generalmente viajamos a velocidades mucho más pequeñas que la velocidad de la luz y no medimos el tiempo en forma muy precisa. Por esta razón no nos damos cuenta que este fenómeno ocurre. Este efecto puede verse todo el tiempo en los aceleradores de partículas. Las partículas viven mucho más tiempo cuando se mueven a velocidades cercanas a la velocidad de la luz.

El espacio y el tiempo se unen en un único concepto: espacio-tiempo.

El tiempo es percibido en forma diferente por dos observadores que se mueven en forma relativa uno del otro. Ambos observadores ven el mismo espacio-tiempo. Existen fórmulas precisas que nos permiten relacionar las observaciones de estos dos observadores.

Volvamos ahora a la gravedad. La gravedad tiene una propiedad muy especial que fue descubierta por Galileo: todos los objetos caen de la misma forma una vez que eliminamos los efectos de la resistencia del aire. En el vacío, una pluma y una piedra caen juntas. Esto no ocurre con otras fuerzas. Una partícula en un campo eléctrico se moverá en forma diferente si se cambia su masa o su carga. En la teoría de la gravedad de Newton, la razón por la cual todas las partículas caen de la misma forma, se debe al hecho de que la fuerza gravitatoria es proporcional a la masa. A veces ésto se llama "Principio de equivalencia"

Einstein se dio cuenta de que la teoría de Newton no era compatible con la relatividad especial, ya que, en la teoría de Newton, la fuerza gravitatoria se propaga instantáneamente. En 1915, Einstein resolvió este problema incorporando naturalmente el principio de equivalencia. La llamó a esta teoría: Relatividad General. Propuso que la gravedad se debe a la curvatura del espacio-tiempo. Las partículas en un espacio-tiempo curvo siguen las líneas más cortas. Dos líneas que inicialmente son paralelas en un espacio curvo podrían luego acercarse unas a otras. Por ejemplo, dos meridianos en el ecuador de la Tierra parten en forma paralela, pero se intersectan en el polo norte. La forma del espacio-tiempo depende de la materia que se mueve sobre él. La relatividad general implica que el transcurso del tiempo depende del campo gravitatorio. Por lo tanto, dos personas que viven en un mismo edificio, uno en el piso superior y otro en el inferior, verían transcurrir el tiempo en forma diferente. Este es un efecto muy minúsculo para un edificio acá en la Tierra – es un efecto de una parte en 10^{15} . Lo que aprendemos es que un objeto masivo curva el espacio y el tiempo. En particular, ésto significa que el tiempo cercano a un objeto masivo transcurre más lentamente que el tiempo más alejado.

Los físicos siempre tratan de estudiar primero las situaciones más sencillas. Por lo tanto, en 1916, poco tiempo después del invento de la relatividad general, un joven alemán llamado Karl Schwarzschild, descubrió la más simple solución esféricamente simétrica a las ecuaciones de Einstein. Estas ecuaciones describen una geometría particular que se pensó era la

geometría generada por una masa puntual. En vez de decir cual es la geometría, concentrémonos en una de sus características: la velocidad a la que funcionan los relojes en distintas posiciones.

Un reloj sobre la superficie del sol funciona más lento- una parte en un millón- que un reloj más alejado. Un reloj sobre la superficie de una estrella de neutrones funciona a 70 % de la velocidad de un reloj alejado de la estrella. En este caso, vemos que el efecto es grande. La solución que Schwarzschild descubrió, indicaba que un reloj en el "centro" se detendría por completo. Al principio la mayoría de los físicos pensaron que éste era un resultado no físico, producto de un análisis demasiado simplificado.

Estudios posteriores demostraron que el "centro" de la solución de Schwarzschild no es un punto, sino una superficie de dos dimensiones (mas el tiempo). Un observador que está viajando a través del espacio-tiempo podría atravesar esta superficie sin sentir nada extraño o peculiar. La gente que se queda fuera del agujero negro ve que todas las señales provenientes del observador que está cayendo disminuyen hasta que finalmente desaparecen a los efectos prácticos. La superficie donde los relojes se detienen por completo (desde el punto de vista de un observador lejano) se llama "horizonte". Esta superficie marca el punto sin retorno. El observador que cruce esta superficie no podrá regresar y se estrellará contra una "singularidad" en el interior. La singularidad es una región de muy alta curvatura espacio-tiempo que lo destrozará. Resulta que el tamaño de un agujero negro en la teoría de Einstein todavía está dado por la fórmula que Laplace calculó en la teoría de Newton, pero la interpretación física es muy diferente.

Los agujeros negros se pueden formar en procesos astrofísicos cuando estrellas que son varias veces más masivas que el sol se quedan sin combustible nuclear e implosionan bajo su fuerza gravitatoria. Existe gran cantidad de evidencia experimental de que hay algunos agujeros negros en el universo. Estos agujeros astrofísicos se presentan en dos tipos principales. Algunos tienen una masa varias veces más grande que la masa del sol y se producen por colapsos estelares. Como los agujeros negros son negros, es muy difícil verlos. Algunas veces tenemos la suerte de que haya gas cayendo dentro del agujero negro. A medida que cae, este gas se calienta y emite una radiación característica que luego se detecta. Este gas puede provenir de otra estrella que esté orbitando alrededor del agujero negro. En otras palabras, podemos comenzar con dos estrellas que están orbitando, una alrededor de otra, una colapsa y se convierte en un agujero negro. Entonces el gas de la otra puede comenzar a caer dentro del agujero negro. Existen también agujeros negros mucho más masivos en el centro de las galaxias. Estos poseen la masa de mil millones de soles. Nuevamente, cuando la materia cae dentro de estos agujeros negros se puede calentar y emitir radiación que es finalmente detectada por nosotros acá en la Tierra. Se cree que todas las galaxias grandes como la nuestra, tienen un agujero negro en el centro.

El objetivo central de esta charla no es describir los agujeros negros astrofísicos, sino explorar las implicancias de los agujeros negros en la estructura del espacio-tiempo.

De acuerdo con la teoría de Einstein, un agujero negro es un agujero en el espacio-tiempo. Cuando uno se cae adentro no se puede volver a salir. Todo lo que se arroje dentro de un agujero negro se pierde para siempre.

Los agujeros negros poseen propiedades universales muy interesantes. Cuando una estrella colapsa en un agujero negro su forma final depende sólo de dos parámetros: la masa y el momento angular. Por lo tanto los agujeros negros son universales. En otras palabras, son independientes de las propiedades particulares y distintivas de la materia que los formó. Independientemente de la composición química de la estrella inicial, siempre obtenemos el

mismo agujero negro. Por lo tanto, los agujeros negros dependen solamente de la teoría de la gravedad y no dependen de los detalles de las otras fuerzas.

Otra característica particular de los agujeros negros es la siguiente: Supongamos que tenemos algún proceso en el que estén involucrados agujeros negros. Por ejemplo, podemos considerar la colisión de dos agujeros negros. Los dos agujeros negros chocan y forman un agujero negro más grande. A propósito, este proceso puede emitir ondas gravitatorias y hay algunos detectores tratando de medirlas. Este proceso es muy difícil de calcular; uno tiene que resolver ecuaciones bastante complicadas. Sin embargo, hay un resultado simple. El área que del horizonte del agujero negro resultante es siempre más grande que la suma de las áreas de los horizontes de los agujeros negros iniciales. El área siempre aumenta. Esto se llama el "teorema del área" y fue demostrado por Hawking en 1970.

Agujeros Negros y la mecánica cuántica

La próxima sorpresa tuvo lugar cuando se estudiaron los efectos de cuánticos.

En la mecánica cuántica, el vacío no es meramente la ausencia de partículas. El vacío es un estado muy interesante donde todo el tiempo tenemos pares de partículas que se crean y se destruyen. En un espacio plano no tenemos producción neta de partículas ya que se debe conservar la energía. Todas las partículas que se producen tienen que aniquilarse muy rápidamente. En 1974, Steven Hawking demostró que cuando existe un horizonte se pueden crear partículas. Lo que puede suceder es que una partícula con energía positiva y una con energía negativa se creen en las cercanías del horizonte. La partícula con energía negativa cae dentro del agujero negro y la que tiene energía positiva escapa. En un espacio plano esto no es posible porque no podemos tener partículas con energía negativa. Sin embargo, del otro lado del horizonte, una partícula que tiene energía negativa desde el punto de vista de un observador alejado, puede tener energía positiva desde el punto de vista de un observador dentro del horizonte. El resultado es que el agujero negro emite partículas. Las partículas emitidas tienen una distribución térmica con una temperatura que es inversamente proporcional a la masa del agujero negro. Para agujeros negros de masa solar esta temperatura es demasiado diminuta para que este resultado sea medible.

Si el agujero negro estuviera en un espacio vacío, perdería masa lentamente y se achicaría. Los agujeros negros con masas más pequeñas podrían tener temperaturas más altas. Un agujero negro con una masa del orden de 10^{18} Kg (la masa de un cordón montañoso) tendría una temperatura de 5.000 grados y parecería blanco. Emitiría tanta luz como una bombita de luz de 1 mili watt. A medida que su masa se hace más y más pequeña su temperatura subiría y se evaporaría más y más rápido hasta que, presumiblemente, se evaporaría por completo. En realidad, si tomáramos una masa de unos pocos kilogramos y la colapsáramos dentro de un agujero negro (algo que sería muy difícil de hacer en la práctica!), se evaporaría completamente en menos de una milésima de segundo y liberaría más energía que una bomba atómica

Esta propiedad térmica de los agujeros negros da origen a un par problemas:

1) ¿Qué origina la entropía? y 2) la paradoja de la información. Trataré de explicar estos dos problemas con más detalle.

La entropía de los agujeros negros

En la física común, las propiedades térmicas siempre surgen del movimiento de los componentes microscópicos. Por ejemplo, la temperatura del aire está relacionada con la velocidad promedio de las moléculas de aire. Existe un concepto íntimamente relacionado llamado "entropía". La entropía es la cantidad de desorden asociado con el movimiento de todos los componentes. La entropía está relacionada con la temperatura por las leyes de la termodinámica, por lo que puede ser calculada sin conocer los detalles microscópicos del sistema. Hawking y Bekenstein demostraron que la entropía de un agujero negro es el área del horizonte dividido por el cuadrado de la longitud Planck, donde $l_{\text{Planck}} = 10^{-33}$ cm. Para un agujero negro macroscópico, ésta es una enorme entropía. Las leyes de la termodinámica continúan siendo válidas si se incluye la contribución del agujero negro a la entropía. Estos son resultados extremadamente desconcertantes ya que no está claro en absoluto cuáles son realmente los "componentes" de un agujero negro. El agujero negro es un agujero en el espacio-tiempo por lo que encontrar sus componentes está íntimamente relacionado con encontrar los componentes más fundamentales de la geometría del espacio-tiempo.

Es muy interesante que la entropía de un agujero negro es proporcional a su área y no a su volumen. A principio de los años 90, 't Hooft y Susskind propusieron que en una teoría que incluye la mecánica cuántica y la gravedad, el número de componentes que son necesarios para describir un sistema no puede ser mayor que el área de la superficie que lo encierra. Esto implica que el espacio-tiempo es bastante diferente de un sólido común, para el cual el número de componentes (los átomos) crecen como el volumen. Para objetos ordinarios la entropía es mucho menor que el área en unidades de la longitud de Planck. Sin embargo, esta observación tiene implicancias teóricas muy interesantes ya que sugiere que una región del espacio-tiempo puede ser descrita en términos de componentes que viven en la frontera de esta región.

La paradoja de la información

Hemos mencionado que podemos fabricar un agujero negro de muchas maneras diferentes, pero siempre parece que terminamos con el mismo agujero negro. En física, normalmente, si comenzamos con condiciones iniciales diferentes, obtenemos estados finales diferentes. A veces, las diferencias son muy sutiles, pero hay diferencias. Permítanme darles un ejemplo. Comenzamos con dos platos y en uno escribimos la letra A y en el otro la B. Luego tiramos cada uno de estos platos al piso para que se rompan en muchos pedazos pequeños. En una primera aproximación, el resultado final es el mismo: cantidades de trozos. Sin embargo, examinando los trozos en detalle, podemos descubrir qué letra estaba escrita en cada plato.

Supongamos que arrojamos uno de estos platos en un agujero negro. Aparentemente, el agujero negro se evaporaría finalmente, en forma completa, a través de la emisión de la radiación de Hawking. En el cálculo de Hawking, esta radiación parece perfectamente térmica e independiente del estado inicial del agujero negro. Así que parece que nunca vamos a recuperar completamente la información acerca de la letra que estaba en el plato originalmente.

Esta parece una cuestión académica muy rebuscada. Nos olvidamos de cosas todo el tiempo y no nos preocupamos! La razón por la que es una cuestión muy importante es que la mecánica cuántica nos dice que las leyes que gobiernan este proceso deberían ser tales que, *en principio*, deberíamos poder recuperar la información. Así que resolver el problema de la información es necesario para una teoría consistente de la gravedad cuántica. Tal teoría debe resolver el problema la información.

Muchos físicos prominentes, incluido S. Hawking, creían que ésto era imposible. Creían que los agujeros negros realmente destruían la información y que teníamos que abandonar la mecánica cuántica. Pensaban que la mecánica cuántica y la gravedad eran fundamentalmente incompatibles y que la teoría correcta no obedecería los principios de la mecánica cuántica, lo que implica que la información no puede perderse.

Al tratar de aclarar esta cuestión se han producido avances interesantes en la teoría de cuerdas y la física de partículas.

Resolviendo estos problemas

Teoría de cuerdas

La mecánica cuántica y la gravedad son dos teorías que no se llevan muy bien.

Los físicos han estado tratando de unirlos en una teoría consistente. A los fines prácticos en nuestra vida diaria, no es muy importante desarrollar una teoría de gravedad cuántica porque la mayoría de los fenómenos físicos con los que nos encontramos, son tales que, podemos olvidarnos de los efectos de la gravedad o podemos olvidarnos de los efectos de la mecánica cuántica. Pero, por otra parte, si queremos entender el origen del universo en los momentos iniciales del Big Bang, entonces necesitamos una teoría consistente. Al principio, tanto la mecánica cuántica como la gravedad, son importantes. Esta es una de las principales motivaciones para encontrar una teoría de la gravedad cuántica.

La teoría de cuerdas es una teoría de gravedad cuántica. Logra unir la mecánica cuántica con la gravedad. No sabemos si es la teoría correcta, pero es la mejor candidata que tenemos. Se llama teoría de "cuerdas" por razones que no son importantes para esta charla. Lo importante es que es una teoría de gravedad cuántica.

Agujeros negros en la teoría de cuerdas

En la teoría de cuerdas es posible describir agujeros negros. En algunas circunstancias especiales, es posible encontrar una descripción microscópica de estos agujeros negros. Por razones técnicas es más fácil entender los agujeros negros que vivir en un espacio-tiempo con curvatura negativa constante. Estos espacio-tiempos son la generalización más simple del espacio plano. El espacio plano tiene curvatura cero. Un ejemplo de un espacio con curvatura positiva es la superficie de una esfera. En la figura 1 pueden ver un "mapa" de un espacio de dos dimensiones con curvatura negativa constante. También podemos considerar espacio - tiempos con curvatura positiva o negativa. Los espacio-tiempos con curvatura negativa efectivamente tienen una frontera en el infinito. Una partícula puede ir al infinito y volver en tiempo finito, esto es posible sólo porque el tiempo transcurre en forma diferente en diferentes posiciones; a medida que nos alejamos el tiempo transcurre más rápido.

En 1997, formulé una conjetura según la cual toda la física gravitatoria en este espacio puede describirse por medio de una teoría de partículas común en la frontera. Esta conjetura fue posteriormente desarrollada por S. Gubser, I. Klebanov, A. Polyakov, E. Witten, y muchos otros físicos. El punto crucial es el siguiente: la teoría de la gravedad, cuya dinámica subyacente no podíamos comprender completamente, es equivalente a una teoría común de

partículas que sí entendemos. Y lo más importante es que esta teoría de la frontera obedece los principios de la mecánica cuántica.

Un agujero negro en el interior se convierte a un estado térmico en términos de las partículas en la frontera. La entropía del agujero negro es sólo la entropía de estas partículas. Los "cuantos elementales" de la geometría del espacio-tiempo son las partículas que viven en la frontera.

La estructura del espacio tiempo

Estas ideas tienen implicancias muy profundas para la estructura del espacio-tiempo. Noten que partimos de una teoría de partículas en la frontera, que tiene dos dimensiones espaciales, mas el tiempo y terminamos con una teoría gravitacional en tres dimensiones espaciales, mas el tiempo. Una de las dimensiones del espacio-tiempo ha salido de la nada! Esta dimensión surge de las interacciones de las partículas en 2+1 dimensiones.

Esto significa decir que el espacio-tiempo no es una entidad fundamental. Es un concepto derivado, válido a largas distancias. Les daré una analogía. Supongan que miramos un lago. Podemos ver agua, olas, pequeños insectos sobre la superficie, etc. La superficie del lago parece un concepto claro y definido. En realidad, podemos escribir ecuaciones que rigen la propagación de las olas, etc. Supongamos que ahora quisiéramos comprender la estructura de la superficie a distancias muy cortas. A distancias microscópicas, esta superficie no es muy clara. Cuando miramos el agua con resolución atómica, vemos que hay moléculas de agua yendo y viniendo del agua constantemente y que es difícil definir exactamente donde está ubicada la frontera. A distancias cortas, la superficie del lago es un concepto mal definido, necesitamos hablar de las moléculas individuales y describir lo que hacen. En forma similar, el espacio-tiempo deja de ser un concepto bien definido a distancias cortas.

Si viviéramos en un espacio curvado negativamente, todo lo que necesitaríamos hacer para entender nuestro universo sería entender la teoría que vive en la frontera.

Sin embargo, no vivimos en un espacio-tiempo curvado negativamente. En realidad, a grandes escalas, nuestro universo parece más un espacio-tiempo curvado positivamente. Hasta ahora, no sabemos si existe una descripción similar para espacio-tiempos curvados positivamente. Tal descripción, si existiera, resolvería el problema de la singularidad del Big Bang.

Bibliografía

Un libro de divulgación sobre agujeros negros es "*Agujeros Negros y Tiempo Curvo*" Kip S. Thorne), Crítica, Barcelona, 1995)

Un libro de divulgación sobre teoría de cuerdas es ``The Elegant Universe'' Brian Greene.



Figura 1: Este dibujo de Escher trata de representar la geometría del espacio hiperbólico. Es la proyección de un espacio hiperbólico sobre un disco. Cada figura tiene el mismo tamaño como en el espacio hiperbólico, pero debido a los efectos distorsivos de la proyección, se hacen más pequeñas en la frontera del disco. En realidad, la frontera del disco está a una distancia infinita alejada de cualquier punto en el interior. Tenemos una distorsión similar cuando representamos el mundo en un planisferio. Con la proyección normal, la zona cercana a los polos aparece desproporcionadamente grande en el mapa. En esta proyección del espacio hiperbólico, tenemos el efecto contrario. El espacio hiperbólico es infinito en tamaño pero parece finito en el dibujo porque la escala usada en la región cercana a la frontera responde a un factor muy grande