

ESTRELLAS NEGRAS

Los efectos cuánticos podrían impedir la formación de agujeros negros genuinos. En su lugar se crearían unos cuerpos muy densos, las estrellas negras

CARLOS BARCELO, STEFANO LIBERATI, SEBASTIANO SONEGO Y MATT VISSER

Los agujeros negros excitan la imaginación: albergan un misterio inconmensurable detrás de la cortina de su “horizonte de sucesos”, no permiten la salida de nada que entre en ellos e irremisiblemente aniquilan lo que ingieren.

Para los físicos teóricos, los agujeros negros son un tipo de solución de las ecuaciones de campo de Einstein en que se funda la teoría general de la relatividad. Esta determina, por una parte, la manera en que la materia y la energía distorsionan el espaciotiempo como si fuera elástico y, por otra, cómo esa curvatura que adquiere el espaciotiempo controla el movimiento de la materia y la energía, es decir, cómo equivale a la fuerza que llamamos gravedad. Las ecuaciones predicen sin ambigüedades la existencia de regiones del espaciotiempo de las que no puede partir ninguna señal que llegue hasta los observadores lejanos. Estas regiones —los agujeros negros— comprenden lugares (“singularidades”) donde la densidad de la materia se aproxima al infinito y una zona vacía de extrema gravedad que los rodea de la que nada, ni siquiera la luz, puede escapar. Un límite conceptual, el horizonte de sucesos, separa la zona de intensa gravedad del resto del espaciotiempo. En el caso más sencillo, el horizonte de sucesos es una esfera de unos 6 kilómetros de diámetro que delimita un agujero negro con la masa del Sol.

Hasta aquí la teoría. ¿Y qué hay de la realidad? Muchas observaciones astrofísicas de alta calidad revelan que el universo contiene cuerpos sumamente compactos desprovistos

de luz o de cualquier radiación propia. Aunque estos objetos oscuros tienen una masa de entre unos pocos soles y más de un millón de soles, su tamaño, en la medida en que cabe determinarlo, va de unos kilómetros a millones de kilómetros, de acuerdo con las predicciones que la relatividad general hace según la masa que tengan.

Aun así, ¿son esos cuerpos oscuros y compactos observados por los astrónomos los agujeros negros predichos por la relatividad general? Los datos observacionales de hoy se ajustan muy bien a la teoría, pero el modo en que la teoría misma describe los agujeros negros resulta insatisfactorio. En concreto, la predicción de que una singularidad reside en el interior de todo agujero negro indica que la teoría falla en ese punto, como suele ocurrir siempre que una teoría predice que una cantidad se torna infinita. Presumiblemente, la teoría yerra por no considerar los efectos cuánticos que tanto la materia como la energía exhiben a escalas microscópicas. La búsqueda de una teoría modificada que incluya la mecánica cuántica, con frecuencia denominada gravedad cuántica, ha promovido una intensa actividad en la física teórica.

La necesidad de una teoría cuántica de la gravedad conduce a preguntas fascinantes: ¿Cómo serían los agujeros negros corregidos por la mecánica cuántica? ¿Totalmente diferentes de los agujeros negros clásicos? ¿O acaso la descripción clásica es una buena aproximación? Los cuatro autores de este artículo hemos demostrado que ciertos efectos cuánticos podrían quizás impedir la formación de los agujeros negros. En su lugar

CONCEPTOS BASICOS

■ Los agujeros negros son estructuras teóricas del espaciotiempo predichas por la teoría de la relatividad general. Nada puede escapar a la gravedad de un agujero negro, una vez atravesado su horizonte de sucesos.

■ Una aproximación cuántica predice que los agujeros negros se evaporan lentamente, aunque de una forma paradójica. Los físicos buscan una teoría cuántica completa y consistente de la gravedad que describa a los agujeros negros.

■ En contra de lo que suele aceptarse, un efecto cuántico llamado polarización del vacío podría adquirir una magnitud suficiente para impedir la formación de un agujero y propiciar la de una “estrella negra” en su lugar.

¿QUE ES UN AGUJERO NEGRO?

Un agujero negro es una región de espaciotiempo curvo con una gravedad tan intensa que nada puede escapar de él. Su propiedad más característica es el horizonte de sucesos: la frontera de la región sin escape. Un agujero negro está prácticamente vacío: su masa parece haberse derrumbado sobre un punto de densidad infinita —una “singularidad”— en las entrañas del agujero.

Un agujero negro con una masa tres veces superior a la solar tendría un diámetro de unos 18 kilómetros.

18 kilómetros

Lejos de una región de gran masa, un destello de luz se expandiría simétricamente en todas las direcciones ①.

Onda de luz un segundo después

1 Destello

Justo por fuera del horizonte de sucesos de un agujero negro, la gravedad captura la mayor parte del destello ②.

Se escapa algo de luz ③.

Si el destello ocurriera en cualquier lugar dentro del horizonte de sucesos, toda la luz sería atraída por la singularidad del agujero negro ④.

En la práctica, se pueden detectar los agujeros negros gracias al material que los circunda y cae hacia ellos. La imagen de la derecha, tomada en 1998 con el Telescopio Espacial Hubble, muestra un enorme disco de gas y polvo del que se cree que alberga un agujero negro supermasivo central. Sin embargo, estas observaciones sólo informan de la presencia de un objeto muy compacto y pesado que apenas emite luz propia (o no la emite en absoluto); los datos no demuestran, estrictamente, que el objeto sea un agujero negro.



aparecería una nueva clase de objeto, a la que hemos bautizado con el nombre de estrella negra. Una estrella negra encontraría cerrado el camino hacia una densidad infinita; tampoco estaría envuelta por un horizonte de sucesos. A una estrella negra la mantendría algo que no suele considerarse un material de construcción resistente: el propio espacio.

El peso de la nada cuántica

Llegamos a nuestras conclusiones gracias a una aproximación venerable, la gravedad semicuásica, pero la aplicamos sin los mismos supuestos de la materia colapsante de las que otros habían partido antes; queríamos ver si de ese modo nos librábamos de pisar el

terreno paradójico en que los demás habían entrado.

En ausencia de una teoría plenamente desarrollada de la gravedad cuántica, durante los últimos 30 años se ha recurrido a la gravedad semicuásica para analizar el efecto de la mecánica cuántica sobre los agujeros negros. Este método incorpora aspectos de la física cuántica —en concreto, la teoría cuántica de campos— a la gravedad clásica de Einstein.

La teoría cuántica de campos describe cada una de las partículas fundamentales —el electrón, el fotón y los quarks, entre otras— en forma de un campo que llena el espacio tal y como lo llena el campo electromagnético. Las ecuaciones de la teoría cuántica se enuncian por lo general en un espaciotiempo plano, es decir, en ausencia de gravedad. La gravedad semicuásica utiliza la teoría cuántica de campos formulada en un espaciotiempo curvo.

En líneas generales, la estrategia de la gravedad semicuásica es la siguiente: la materia agrupada en alguna configuración particular produciría, de acuerdo con la teoría clásica de la relatividad general, un espaciotiempo curvo determinado. Sin embargo, la curvatura del espaciotiempo modifica la energía de los campos cuánticos. Esta energía modificada cambia, conforme a la relatividad general clásica, la curvatura del espaciotiempo. Y así continuamente, iteración tras iteración.

El objetivo es obtener una solución coherente: un espaciotiempo curvo con una configuración de campos cuánticos cuyas energías generen esa misma curvatura. Esa clase de soluciones debería proporcionar una buena aproximación de la realidad en muchas situaciones en que intervengan los efectos cuánticos y la gravedad, aun cuando la gravedad misma no haya sido descrita por la teoría cuántica. Por tanto, la gravedad semicuásica incorpora las correcciones cuánticas “mínimas” a la relatividad general (tiene en cuenta el comportamiento cuántico de la materia, pero trata la gravedad, es decir, la curvatura del espaciotiempo, a la manera clásica).

Esta aproximación tropieza, sin embargo, con un embarazoso problema: el cálculo directo de la menor energía posible de los campos cuánticos (o “punto cero”, la energía cuando no hay partículas de ninguna clase, la energía del vacío) produce un resultado infinito. Este mismo problema ya aparece en la teoría cuántica de campos común (es decir, en un espacio plano sin gravedad). Afortunadamente para los teóricos que desean predecir los fenómenos físicos que no tienen gravedad, las partículas se comportan de un modo que depende sólo de las diferencias de energía entre los distintos estados en que puedan encontrarse, por lo

que el valor de la energía cuántica del vacío no desempeña ningún papel. Gracias a una sustracción cuidadosa, la “renormalización”, las diferencias de energía se computan con una precisión extrema.

Con la gravedad en escena, sin embargo, la energía de vacío importa. Una densidad infinita de energía parece que debería producir una gigantesca curvatura del espaciotiempo; esto es, incluso un espacio “vacío” tendría una intensa fuerza gravitatoria que no sería ni remotamente compatible con el universo que observamos hoy día. Las observaciones astronómicas de los últimos diez años indican que la contribución neta del punto cero a la densidad total de energía es muy pequeña. La gravedad semicásica no pretende resolver este problema. En vez de intentar dar con una solución, se prefiere pensar que, sea la que sea, anulará la contribución del punto cero a la densidad de energía del espaciotiempo plano. Tal suposición crea un vacío semicásico coherente: la densidad de energía es cero allí donde la relatividad general predice un espaciotiempo plano.

Si hay materia presente, el espaciotiempo es curvo, lo que altera la densidad de energía del punto cero de los campos cuánticos, de modo que la energía del punto cero no se anula con toda exactitud. Se dice que el remanente está causado por la polarización del vacío, en analogía con el efecto de una carga eléctrica

CATEGORÍAS DE AGUJEROS NEGROS

Según la relatividad general, un agujero negro queda perfectamente definido por tres magnitudes: masa, momento angular y carga eléctrica. No existe ninguna diferencia por lo que haya dentro del agujero: materia, antimateria o energía, o una combinación de las tres.

Los astrónomos han observado agujeros negros con tres clases de masa. Los agujeros con masas entre 5 y 15 veces la solar proceden de estrellas moribundas. Muchas galaxias albergan un agujero de millones o miles de millones de masas solares en su núcleo. Se han detectado agujeros con miles de masas solares en el centro de los cúmulos globulares estelares.

que polariza el medio (*véase el recuadro “Lo que el vacío puede hacer”*).

Hemos descrito las propiedades de la gravedad semicásica en términos de masa y densidad de energía, pero en la relatividad general no son sólo esas magnitudes las que producen la curvatura del espaciotiempo. La densidad de momento y las presiones y tensiones asociadas a una sustancia gravitante específica también contribuyen. Con un solo objeto fisicomatemático, el tensor de energía y tensiones (TET), se describen todas las magnitudes productoras de curvatura. La gravedad semicásica presupone que en un espaciotiempo plano las contribuciones de punto cero de los campos cuánticos al TET total se anulan. El objeto fisicomatemático obtenido tras aplicar al TET tal sustracción se denomina tensor renormalizado de energía y tensiones (TRET).

Cuando se aplica al espaciotiempo curvo, la sustracción tiene éxito en la anulación de la parte divergente del TET, pero deja en el TRET un valor finito no nulo. El resultado final es un proceso iterativo: la materia clásica curva el espaciotiempo mediante las ecuaciones de Einstein en una cantidad fija por el TET clásico de la materia. Esa curvatura hace que el vacío cuántico adquiera un TRET finito no nulo. Este TRET del vacío se convierte en una fuente adicional de gravedad, que modifica la curvatura. La nueva curvatura induce un TRET de vacío diferente, y así sucesivamente.

LA PARADOJA DE LOS AGUJEROS NEGROS CUÁNTICOS

Las ecuaciones clásicas (es decir, no cuánticas) de la relatividad general prohíben que emerja algo del horizonte de sucesos de un agujero negro. Sin embargo, Stephen W. Hawking realizó cálculos cuánticos en la década de los setenta que predicen la

lenta emisión por parte de los agujeros negros de partículas de un modo aleatorio (*izquierda*). La aleatoriedad crea una situación paradójica (*derecha*): el “problema de la información”.

SE EMITE RADIACIÓN HAWKING

Incluso en el espacio vacío, los procesos cuánticos producen constantemente parejas de partículas virtuales y sus antipartículas, que se aniquilan entre sí.



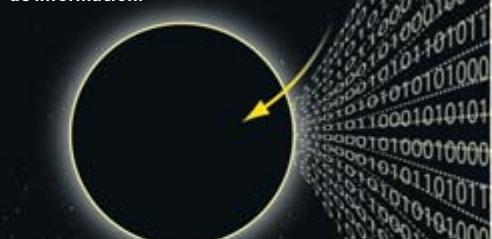
Cerca del horizonte de sucesos de un agujero negro, una partícula virtual podría ser capturada por el agujero y una segunda podría escapar. La partícula escapada transporta masa positiva y la capturada lleva masa negativa dentro del agujero, reduciéndose por tanto la masa del agujero.

Si nada cae dentro del agujero, la masa y el horizonte de sucesos merman gradualmente. Este proceso de evaporación se acelera cuanto más pequeño se hace el agujero.



SE PIERDE INFORMACIÓN

La materia que cae dentro de un agujero negro transporta una gran cantidad de información.



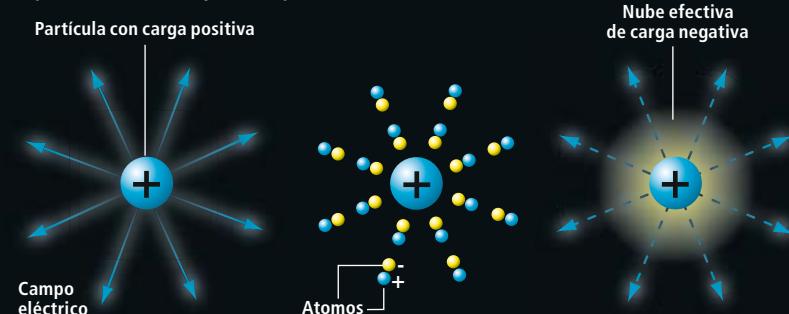
El descubrimiento de Hawking indica que un agujero negro se puede evaporar hasta quedar sin masa, pero las partículas aleatorias emitidas no transportan información. La aparente pérdida de información viola la propiedad fundamental de la mecánica cuántica llamada unitariedad. Esta contradicción ha de resolverse.

LO QUE EL VACÍO PUEDE HACER

En la relatividad general clásica, el espaciotiempo es dinámico y su curvatura produce la gravedad. Un efecto cuántico llamado polarización del vacío proporciona otro mecanismo por el que el espacio vacío podría desempeñar una función activa en el universo.

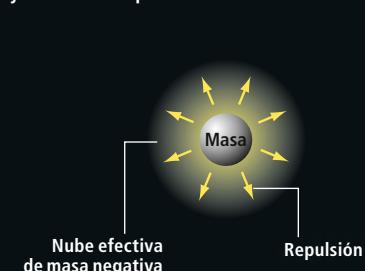
ANALOGIA ELECTRICA

En un medio, el campo eléctrico de un objeto cargado (*izquierda*) polariza los átomos cercanos (*centro*) y reduce con ello el campo eléctrico total (*derecha*). La teoría cuántica de campos revela que incluso el vacío puede polarizarse, ya que el campo eléctrico polariza los pares de partículas virtuales y sus antipartículas.



POLARIZACION DEL VACIO

En la relatividad general, el papel de la carga eléctrica lo adoptan la masa y la energía, y el papel del campo eléctrico, el espaciotiempo curvo o gravedad. La polarización del vacío produce un déficit energético (una nube de energía negativa) y una fuerza repulsiva.



Los agujeros negros corregidos cuánticamente

Describa la aproximación de la gravedad semi-clásica, la pregunta es: ¿qué efecto tienen las correcciones cuánticas sobre las predicciones relativas a los agujeros negros? En particular, ¿cómo se modifica el proceso de formación de un agujero negro?

El agujero negro más sencillo de una masa determinada (digamos M veces la masa del Sol) es aquel que no rota y no tiene carga eléctrica. Un agujero así tiene un radio R igual a $3M$ kilómetros. Se denomina a R "radio gravitatorio" o "radio de Schwarzschild" para esa masa concreta. Si por alguna razón parte de la materia colapsa para ocupar una región inferior al radio gravitatorio, se forma un agujero negro; desaparece dentro de su propio horizonte de sucesos.

El Sol, por ejemplo, tiene un radio de 700.000 kilómetros, mucho mayor que su radio gravitatorio (3 kilómetros). Las ecuaciones pertinentes de la gravedad semicuásica manifiestan claramente que el TRET del vacío cuántico es despreciable en esta situación. Por tanto, el Sol está muy lejos de formar un agujero negro de acuerdo con las ecuaciones clásicas; las correcciones cuánticas no modifican tal conclusión. Sin duda, los astrofísicos pueden ignorar los efectos de la gravedad cuántica en su estudio del Sol y de la mayoría de los otros objetos astronómicos.

Las correcciones cuánticas son importantes, pese a todo, si una estrella no es mucho mayor que su radio gravitatorio. En 1976 David G. Boulware, ahora en la Universidad de Washington, analizó el caso de una estrella compacta estacionaria (es decir, fuera de la

fase de colapso). Probó que cuanto más cerca estuviera la estrella de su radio gravitatorio, mayor sería el TRET del vacío cerca de la superficie; iría aumentando con la cercanía hasta una densidad energética infinita. Este resultado implica que la teoría de la gravedad semicuásica no tolera, como solución de las ecuaciones, la existencia de agujeros negros estacionarios (en los que el horizonte de sucesos permanece con un tamaño constante).

El resultado de Boulware, no obstante, no nos dice qué hay que esperar en el caso de una estrella en colapso, la cual, según la relatividad general clásica, derivaría en un agujero negro. Stephen W. Hawking ya había atacado este problema un año antes empleando técnicas algo diferentes, y demostró que un agujero negro clásico formado por colapso emite partículas aleatorias. Más precisamente, las partículas presentan una distribución de energías propia de la radiación térmica: el agujero negro tiene una temperatura. Conjeturó que los agujeros negros corregidos con la mecánica cuántica serían esencialmente agujeros negros clásicos sujetos a una lenta evaporación por medio de esa radiación. Un agujero negro de una masa solar tiene una temperatura de 60 nanokelvin. El ritmo de evaporación sería tan lento, que el agujero absorbería mucha más radiación del fondo cósmico que la que emitiría; por tanto, su tamaño crecería. En la práctica, un agujero negro de esa masa en fase de evaporación no se distinguiría de un agujero negro clásico: la evaporación sería inmensurablemente pequeña.

El enorme esfuerzo realizado por los teóricos en el decenio posterior al trabajo de Hawking, incluido el cálculo de aproximación

Los autores

Carlos Barceló, Stefano Liberati, Sebastiano Sonego y **Matt Visser** han colaborado en combinaciones y permutaciones varias desde principios del nuevo milenio. Barceló es profesor de física teórica y vicedirector del Instituto de Astrofísica de Andalucía. Liberati es profesor adjunto de astrofísica de la Escuela Internacional de Estudios Avanzados de Trieste. Sonego enseña física matemática en la Universidad de Udine. Visser es profesor de matemáticas de la Universidad Victoria de Wellington, en Nueva Zelanda.

del TRET en las configuraciones de colapso, reforzaron la idea de que las cosas serían realmente así. Hoy día, los físicos tienden a creer que los agujeros negros se forman tal y como describe la teoría clásica de la relatividad general y posteriormente experimentan una lenta evaporación cuántica a causa de la radiación de Hawking.

El problema de la información

El descubrimiento de Hawking de la evaporación de los agujeros negros, unido a los resultados anteriores de Jacob D. Bekenstein, de la Universidad Hebrea de Jerusalén, desveló una profunda relación —aunque no bien comprendida— entre la gravedad, la física cuántica y

la termodinámica. Al mismo tiempo, abrió problemas nuevos. Quizás el más importante es el llamado problema de la información, íntimamente relacionado con la cuestión de cuál es el resultado final de la evaporación de un agujero negro.

Tómese como ejemplo una gran estrella en fase de colapso gravitatorio. La estrella alberga una vasta cantidad de información, consistente en las posiciones, velocidades y otras propiedades de sus más de 10^{55} partículas. Supóngase que la estrella forma un agujero negro que a lo largo de los eones se evapora emitiendo radiación Hawking. La temperatura de un agujero negro es inversamente proporcional a su masa; por tanto, un agujero negro en evaporación se vuelve más caliente y se evapora más rápidamente a medida que la masa y el tamaño disminuyen. Una explosión gigantesca expulsa lo que queda de la masa del agujero. Pero, ¿qué es lo que permanece? ¿Desaparece por completo el agujero o queda algún tipo de remanente? En cualquier caso, ¿qué es lo que le ocurre a toda la información de la estrella? De acuerdo con los cálculos de Hawking, las partículas emitidas por el agujero no contienen información esencial del estado inicial de la estrella. Aunque hubiera algún tipo de remanente de agujero negro, ¿cómo podría un objeto tan pequeño contener toda la información existente en la estrella original?

La desaparición de la información importa porque uno de los pilares fundamentales de la teoría cuántica es que los estados cuánticos evolucionan de una manera llamada unitaria, por la que ninguna información debería perderse jamás. La información podría ser inaccesible en la práctica, como cuando se quema una enciclopedia, pero en un principio la información contenida en ella sigue presente en el humo y las cenizas.

Puesto que los cálculos que predicen la radiación de Hawking descansan en la gravedad semiclásica, los físicos no pueden estar seguros de si la pérdida de información es un artefacto de las aproximaciones empleadas o una propiedad que subsistirá cuando descubramos cómo se computa el proceso con exactitud.

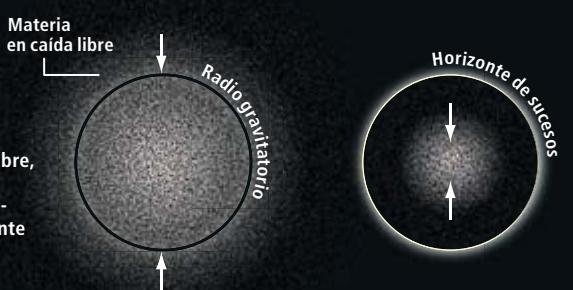
Si el proceso de evaporación destruye la información, las ecuaciones correctas de la gravedad cuántica deben violar la naturaleza unitaria de la mecánica cuántica tal y como la conocemos. Por el contrario, si la información se conserva y la teoría completa de la gravedad cuántica revelara dónde se encuentra en la radiación, habría que modificar o la relatividad general o la mecánica cuántica.

NACE UNA ESTRELLA NEGRA

Se forma un agujero negro cuando la materia colapsa por su propio peso y no hay ninguna fuerza que lo impida. La idea común es que los efectos cuánticos no son lo suficientemente grandes para parar el colapso. Los autores no están de acuerdo.

EL COLAPSO RÁPIDO NO SE PARA

La polarización del vacío es demasiado pequeña para la materia en caída libre, aun cuando ésta sea una materia con densidad suficiente para formar horizonte de sucesos y convertirse en un agujero negro.

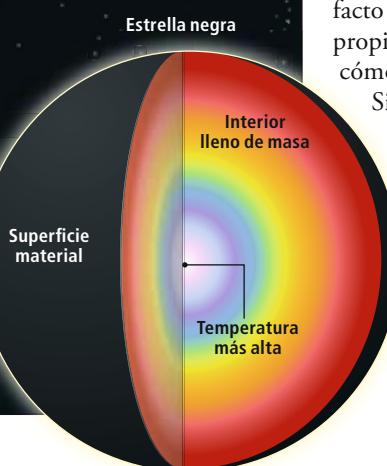
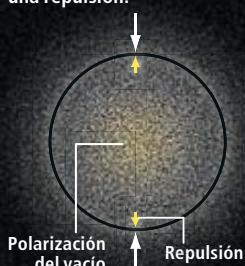


LOS COLAPSOS LENTOS PUEDEN DILATARSE ETERNAMENTE

Si la caída de la materia se ralentiza, la polarización del vacío aumenta y produce una repulsión.

La repulsión frena el colapso e intensifica así la polarización aún más.

Se retraza el colapso y nunca se llega a formar un horizonte de sucesos.



ESTRELLA NEGRA

El resultado es una estrella negra. El campo gravitatorio a su alrededor es igual que el de un agujero negro, pero el interior de la estrella está lleno de materia y no se forma un horizonte de sucesos. Una estrella negra podría emitir radiación de Hawking, si bien transportaría la información atrapada dentro de la estrella negra; se conservaría, pues, la unitariedad. Si se pudiera pelar una estrella negra capa a capa, como una cebolla, lo que a cada paso iría quedando sería en sí mismo una estrella negra más pequeña, que también emitiría radiación. Los agujeros negros pequeños emiten más radiación y tienen temperaturas más altas que los agujeros mayores; también una estrella negra es más caliente hacia su interior.

Una alternativa radicalmente distinta

El problema de la información y otros rompecabezas relacionados nos han motivado (así como a otros equipos) a revisar la línea de razonamiento que condujo a los físicos de la década de los setenta del siglo xx a los agujeros negros casi clásicos con evaporación. Hemos encontrado que la predicción semicásica de que los agujeros negros se forman por colapso gravitatorio, incluso cuando se tienen en cuenta los efectos cuánticos, depende de varias suposiciones técnicas con frecuencia no declaradas.

OTRAS SALIDAS DEL AGUJERO

Muchos investigadores han propuesto objetos más o menos exóticos como alternativa a la idea común —aunque paradójica— de los agujeros negros evaporantes y que sirvan para explicar los cuerpos compactos y oscuros observados por los astrónomos. El rasgo común a todas las propuestas (y a nuestra hipótesis de las estrellas negras) es la ausencia de un horizonte de sucesos.

ESTRELLAS DE VACÍO GRAVITATORIO

La geometría del espacio-tiempo alrededor de una “estrella de vacío gravitatorio” (*gravastar*) sería indistinguible de la de un agujero negro mientras se diste más de 10^{-35} metros de la región esférica donde se habría situado el horizonte de un agujero clásico. El horizonte sería sustituido por una envoltura de materia y energía con un espesor de 10^{-35} metros (longitud de Planck, la escala de longitud en la que los efectos cuánticos de la gravedad adquieren importancia). El interior de una estrella de vacío gravitatorio sería un espacio vacío con una polarización tan intensa, que repelería el colapso de la envoltura de materia. En tales objetos hipotéticos, las nociones clásicas de geometría se rompen en la región que separa el interior del exterior.

COMPLEMENTARIEDAD DEL AGUJERO NEGRO

En la mecánica cuántica ordinaria, por complementariedad se entiende que en la observación un objeto se manifestará como partícula o como onda, pero no como ambas naturalezas a la vez. De igual modo, la mecánica cuántica de los agujeros negros podría albergar una nueva clase de complementariedad. Un observador situado fuera del agujero podría tener una descripción de la geometría observable (por ejemplo, una membrana con ciertas propiedades físicas en lugar del horizonte de sucesos), mientras que un observador en el interior del agujero debería utilizar una descripción diferente.

BOLAS DE PELUSA

Los proponentes de las “bolas de pelusa” sostienen que el horizonte podría representar una región de transición entre un exterior con una geometría clásica y un interior cuántico donde no se puede especificar una noción definida de espacio-tiempo. El interior sería descriptible con la teoría de cuerdas y no tendría ninguna singularidad. La geometría exterior (por ejemplo, la geometría de un agujero negro de 10^{30} kilogramos) podría contener cualquier número exponencialmente grande de estados cuánticos de cuerdas. La imagen semicásica de un agujero negro —con un horizonte de sucesos, entropía gigantesca, una temperatura y una emisión de radiación Hawking— respondería a un promedio estadístico de todos los interiores posibles, análogo a la descripción de un volumen de gas que ignora las posiciones y movimientos exactos de los átomos individuales.



En particular, los viejos cálculos suponen que el colapso sucede muy deprisa: necesita el mismo tiempo que se requeriría para que el material de la superficie de la estrella cayera libremente hacia el centro. Encontramos que, para colapsos más lentos, los efectos cuánticos producirían una nueva clase de objeto muy compacto que no tiene un horizonte de sucesos y es, por tanto, mucho menos problemático.

Como ya hemos mencionado, el TRET del vacío cuántico en un espacio-tiempo curvado por una estrella típica es despreciable en todas partes. Cuando la estrella comienza a colapsar, el TRET debería cambiar. No obstante, la conclusión antigua de que el TRET continúa siendo ínfimo se sostiene si el colapso ocurre tan rápido como la caída libre.

Sin embargo, si el colapso sucede de manera notablemente más lenta, el TRET puede adquirir valores grandes y negativos en las regiones próximas al radio de Schwarzschild, allí donde se formaría el horizonte de sucesos clásico. Un TRET negativo produce repulsión y a su vez frena aún más el colapso. El colapso podría llegar a su fin justo antes del horizonte, o continuar para siempre a un ritmo cada vez más lento, acercándose más y más a la formación de un horizonte que nunca llegará a nacer de verdad.

Este resultado no hace imposible la creación de agujeros negros. Una nube esférica de materia perfectamente homogénea, digamos de unos 100 millones de soles, que cayese libremente por su propio peso, produciría un horizonte de sucesos. Para cuando alcanza la compacidad necesaria para formar el horizonte, una nube así de grande presenta una densidad comparable a la del agua, demasiado baja para que el TRET crezca e impida la formación del horizonte. Pero sabemos que el universo no siguió ese patrón. Las gigantescas nubes de materia casi homogéneas que aparecieron tras las primeras fases de la gran explosión (*Big Bang*) no colapsaron para formar agujeros negros. En su lugar se desarrollaron otras estructuras.

Primero aparecieron las estrellas; el calor de sus reacciones nucleares retrasó el colapso del gas durante algún tiempo. Cuando una estrella consume casi todo su combustible nuclear podría evolucionar hacia una enana blanca o, si tiene masa suficiente, explotar como supernova y dejar tras de sí una estrella de neutrones (una esfera hecha de neutrones con un tamaño algo superior al radio de gravedad). En cualquier caso, se trata de un efecto puramente cuántico —el principio de exclusión de Pauli— el que impide colapsar más.

Los neutrones de una estrella de neutrones no pueden permanecer en el mismo estado cuántico y la presión resultante aguanta el colapso gravitatorio. La misma historia aplicada a los iones y electrones explica la estabilidad de la enana blanca.

Si la estrella de neutrones gana más masa, la aplastante carga gravitatoria supera a los neutrones y de nuevo entra en fase de colapso. Desconocemos qué ocurre después (aunque la formulación ordinaria dice que se formaría un agujero negro). Se ha conjecturado la aparición de una gran variedad de objetos (estrellas de quarks, estrellas raras, estrellas de bosones y bolas Q) estables a presiones demasiado altas para las estrellas de neutrones. Se deben desarrollar mejor las ecuaciones que describen el comportamiento de la masa a densidades mayores que las de los neutrones para saber qué conjectura es la correcta, si alguna lo es.

Por tanto, la experiencia nos dice que la materia que se ajusta a las leyes de la mecánica cuántica parece encontrar siempre mecanismos que frenan el colapso gravitatorio. Aunque cualquier freno pudiera ser sobrepasado (una configuración estable siempre puede pasar a inestable añadiendo más materia), cada proceso que retraza el colapso proporciona tiempo adicional para que aumente el valor TRET negativo del vacío cuántico. Este TRET podría asumir la tarea de contrapesar el empuje gravitatorio, y puesto que la repulsión aumentaría sin límite, pararía el colapso de la materia e impediría que hubiese un agujero negro.

Estrellas negras

Los cuerpos resultantes bien podrían ser los que hemos bautizado como estrellas negras. Debido a su tamaño tan diminuto y a su alta densidad, comparten muchas propiedades observacionales con los agujeros negros, pero conceptualmente son muy diferentes. Las estrellas negras son cuerpos materiales, con una superficie material y un interior de materia muy densa. Son objetos muy débiles porque la luz de su superficie estaría fuertemente desplazada al rojo —la luz se estiraría— al viajar desde un espacio muy curvo cercano a la estrella negra hasta los lejanos observadores. En principio, podrían realizarse estudios astrofísicos completos de las estrellas negras porque no existe el obstáculo de un horizonte de sucesos.

Dentro de la familia de las estrellas negras, algunas podrían parecerse a los agujeros negros evaporantes porque emitirían una radiación similar a la radiación de Hawking. Para el caso concreto en que el colapso se aproxima a la formación del horizonte de sucesos pero nunca llega a ella, hemos demostrado que la estrella negra emite unas partículas con un

¿QUE VIENE DESPUES?

El próximo estudio sobre el escenario de la estrella negra debe mostrar sistemas físicos específicos en los que la polarización del vacío logre detener el colapso conforme a la gravedad semicásica.

Al describir los agujeros negros cuánticos como fajos de unos entes fundamentales denominados "branas", los teóricos de cuerdas han reproducido las predicciones de la gravedad semicásica para ciertos casos especiales. Esperan poder extender sus resultados a toda clase de agujeros negros.

La solución definitiva del problema de la información y del destino de la materia en colapso requerirá muy probablemente el desarrollo de una teoría completa de la gravedad.

espectro de energía del tipo planckiano (muy similar al espectro térmico) y una temperatura ligeramente inferior a la temperatura de Hawking. Al carecer de horizonte, la estrella negra no puede encerrar ninguna información. En su lugar, las partículas emitidas y la materia que reste dentro de la estrella negra albergarán toda la información. La física cuántica estándar describiría la formación y los procesos de evaporación. Las estrellas negras no resuelven el problema de la información mientras existan medios de crear horizontes de sucesos en cualquier punto del universo.

Estos objetos en evaporación podrían llamarse cuasi agujeros negros porque vistos desde fuera tienen aproximadamente las mismas propiedades termodinámicas que los agujeros negros evaporantes. Su interior, sin embargo, mostraría un cambio continuo de temperaturas, en aumento hacia el centro. Si se imagina el objeto como una estructura de capas concéntricas, una estructura de cebolla, cada capa estaría encogiéndose despacio, pero nunca se alcanzaría la compacidad suficiente, ni en la capa ni dentro de ella, capaz de formar el horizonte. El colapso de todas las capas lo impide el TRET del vacío que, según predecimos nosotros, se produciría en un colapso lento. Las capas más interiores mostrarían temperaturas más altas, al igual que los agujeros negros de menor masa. No sabemos si estos objetos tan atractivos existen de forma natural o si son excepcionales.

Sobre el horizonte

El estudio de los agujeros negros ha provocado siempre reacciones muy dispares por parte de los investigadores. Por un lado, resulta excitante pensar que esconden en su interior la puerta a nuevas posibilidades inimaginables de la física, aunque sólo para quienes se decidan entrar. Por otro lado, las implicaciones de los agujeros negros con frecuencia preocupan a los físicos; la búsqueda de otras alternativas a los agujeros negros, casi siempre motivada por el desagrado con una o varias de sus propiedades, es tan antigua como la idea misma de los agujeros.

Nuestra propuesta de estrella negra y las otras alternativas a los agujeros negros propuestas por diferentes grupos tienen en común que el espacio-tiempo que rodearía a esos nuevos objetos sería esencialmente idéntico al que rodea un agujero negro clásico, hasta muy, muy cerca de donde se forma el horizonte de sucesos. Aunque la puerta secreta que conduce al conocimiento de cómo se fusionan la física cuántica y la gravedad se halle fuera de nuestro alcance, podría no estar oculta para nosotros en el interior de esa fortaleza impenetrable que es el horizonte de sucesos.

Bibliografía complementaria

FATE OF GRAVITATIONAL COLLAPSE IN SEMICLASSICAL GRAVITY. Carlos Barceló, Stefano Liberati, Sebastiano Sonego y Matt Visser en *Physical Review D*, vol. 77, n.º 4, 19 de febrero, 2008.

SMALL, DARK, AND HEAVY: BUT IS IT A BLACK HOLE? Matt Visser, Carlos Barceló, Stefano Liberati y Sebastiano Sonego en *Proceedings of Black Holes in General Relativity and String Theory*, agosto, 2008.

THE FUZZBALL PROPOSAL FOR BLACK HOLES. K. Skenderis y M. Taylor en *Physics Reports*, vol. 467, n.º 4-5, págs. 117-171; octubre, 2008.

THE BLACK HOLE WAR: MY BATTLE WITH STEPHEN HAWKING TO MAKE THE WORLD SAFE FOR QUANTUM MECHANICS. Leonard Susskind. Little Brown, 2008.