

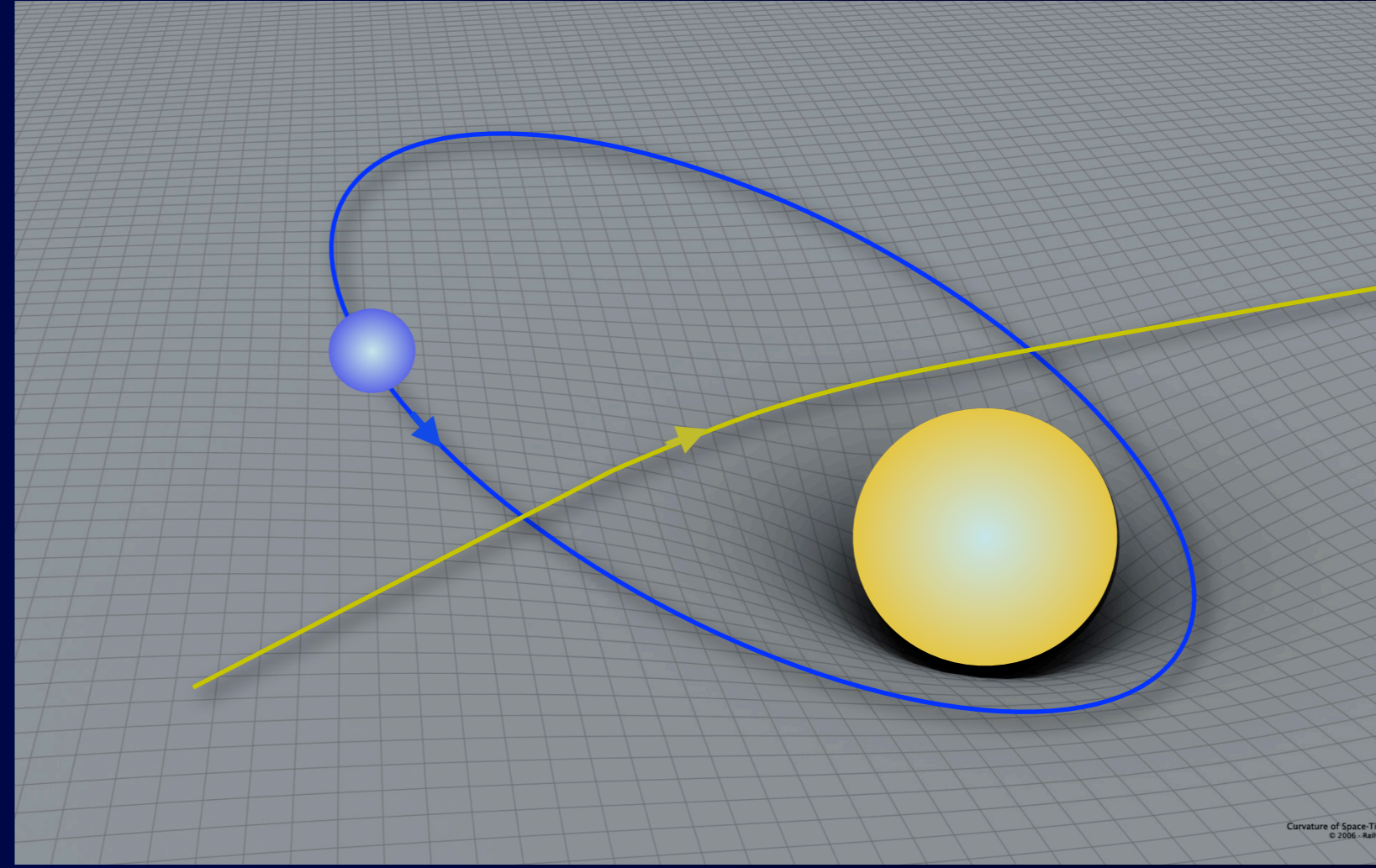
La fuerza de la gravedad está descrita por la Relatividad General

De Newton...

En la teoría de la **gravedad de Newton**, la fuerza gravitatoria se transmite de forma instantánea, como una **acción a distancia**. Por ello, es incompatible con la Relatividad Especial, en la que ninguna señal puede propagarse a velocidad mayor que la luz.

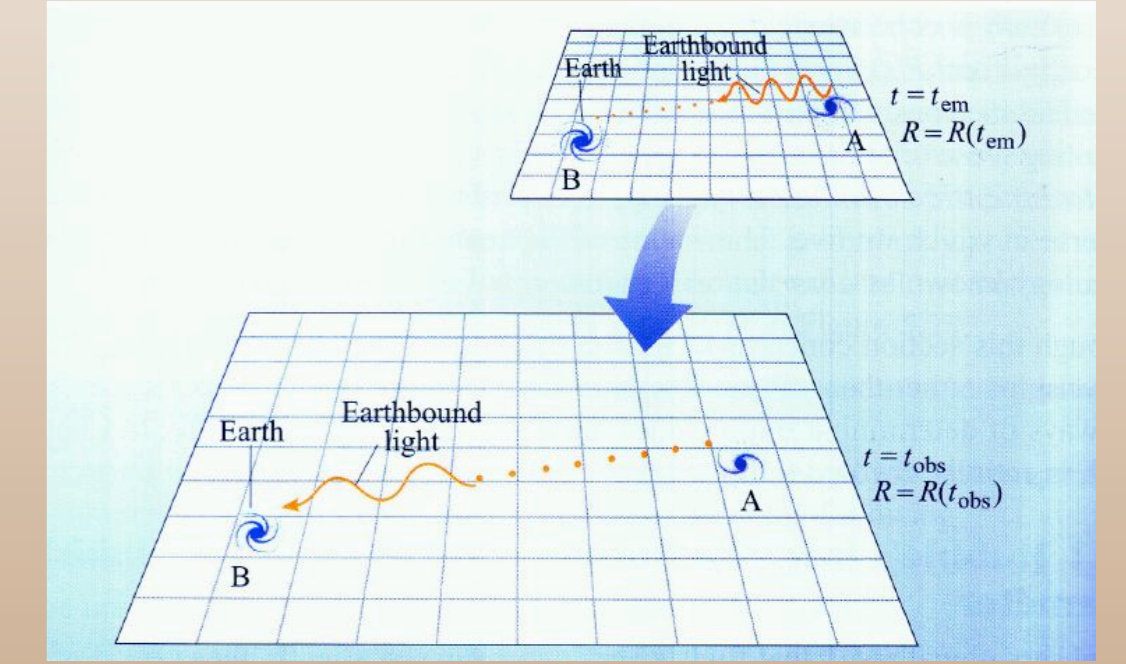
... a Einstein

Con su Teoría de la Relatividad General, Einstein comprendió que un campo gravitatorio se debe describir como una **deformación del espacio-tiempo**. Esta deformación curva las trayectorias de los objetos, dando lugar a la caída de objetos en la Tierra, las órbitas planetarias, y el movimiento de las estrellas y galaxias en el Universo.

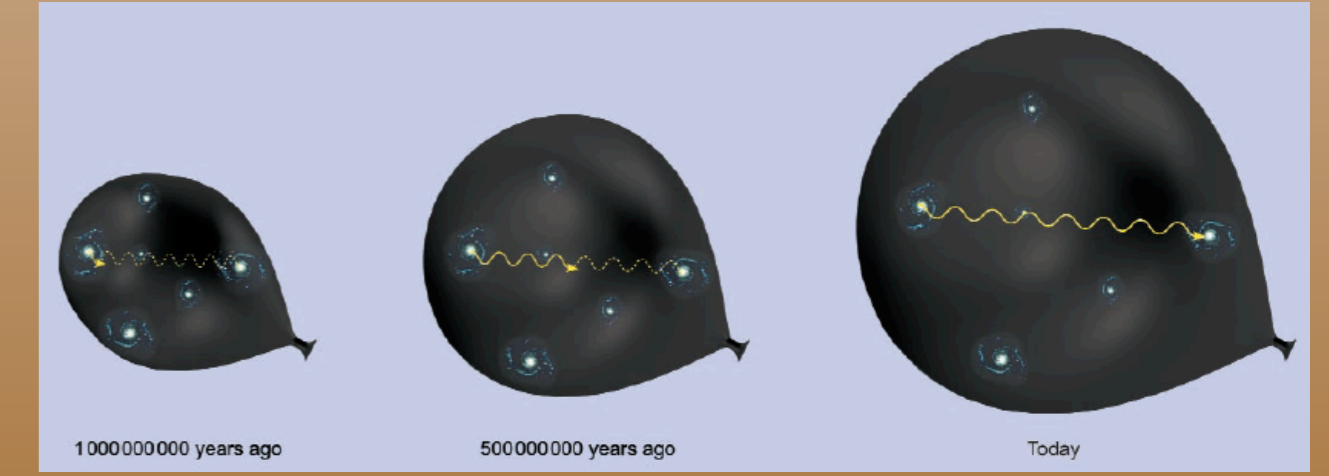


Cosmología

En Relatividad General, el espacio-tiempo es dinámico. Esto permite describir la **expansión del Universo** desde el Big Bang, como la expansión del espacio vacío entre galaxias, de modo que las galaxias más alejadas entre sí se separan con mayor velocidad.



El efecto es similar a la separación de puntos en la superficie de un globo que se hincha. A mayor separación, mayor velocidad de alejamiento respectivo.



En el Universo, los agujeros negros nacen en el colapso de estrellas muy masivas. También hay agujeros negros supermasivos, con millones de masas solares, en el centro de las galaxias, como en la Vía Láctea.

Agujeros negros clásicos

Un agujero negro es un cuerpo tan masivo que ni la luz puede escapar de su atracción gravitatoria. La superficie sobre la que la velocidad de escape es igual a la de la luz se denomina **horizonte**. Para cualquier señal procedente del interior del horizonte es imposible escapar al exterior, más bien su trayectoria se ve irremediablemente abocada a un encuentro con una singularidad, una región de curvatura infinita. La solución de Schwarzschild de la Relatividad General describe el espacio-tiempo con un agujero negro cuyo radio del horizonte es

$$\text{Radio de Schwarzschild } r_s = \frac{2GM}{c^2}$$

Gravedad Cuántica

Escala de Planck

Las singularidades son regiones de tamaño infinitamente pequeño, por lo que su física requiere una formulación cuántica (aún no establecida) de la Relatividad General.

La energía a la que se manifestaría el carácter cuántico de la gravedad es la **escala de Planck**. Es la energía de una partícula cuya longitud de Compton es igual a su radio de Schwarzschild.

$$M_P = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}}$$

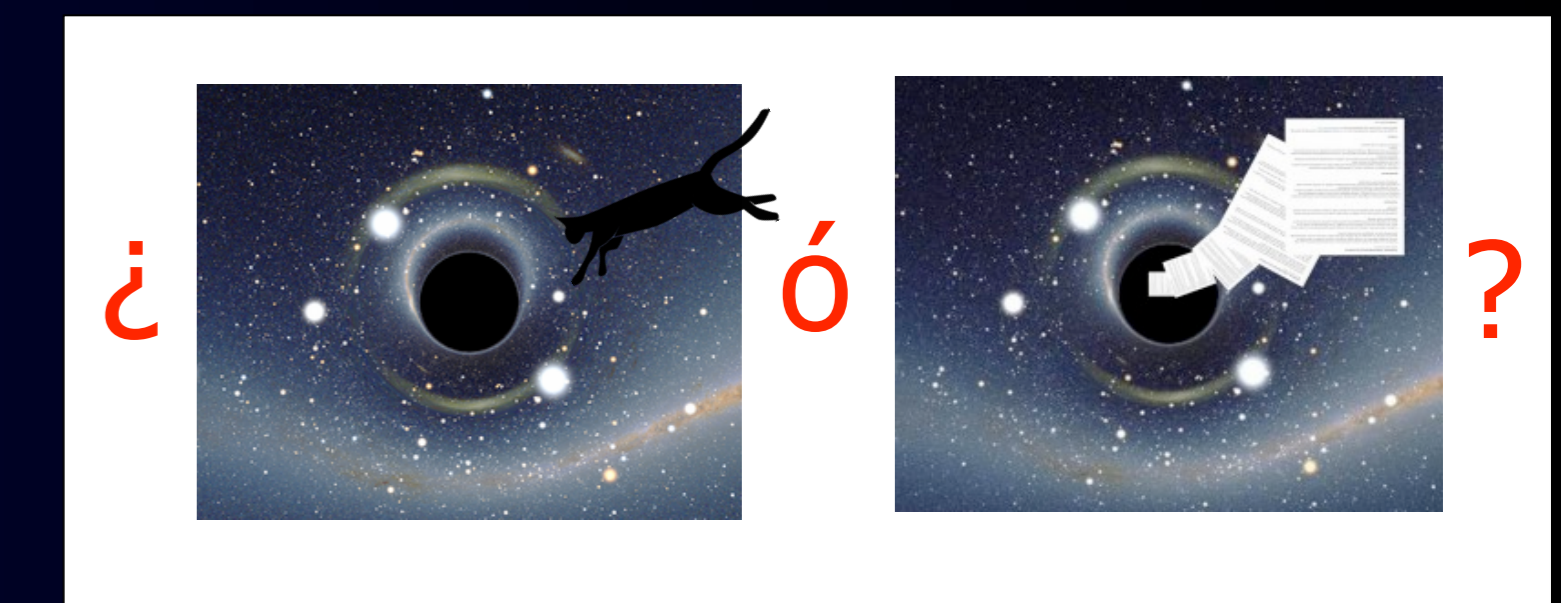
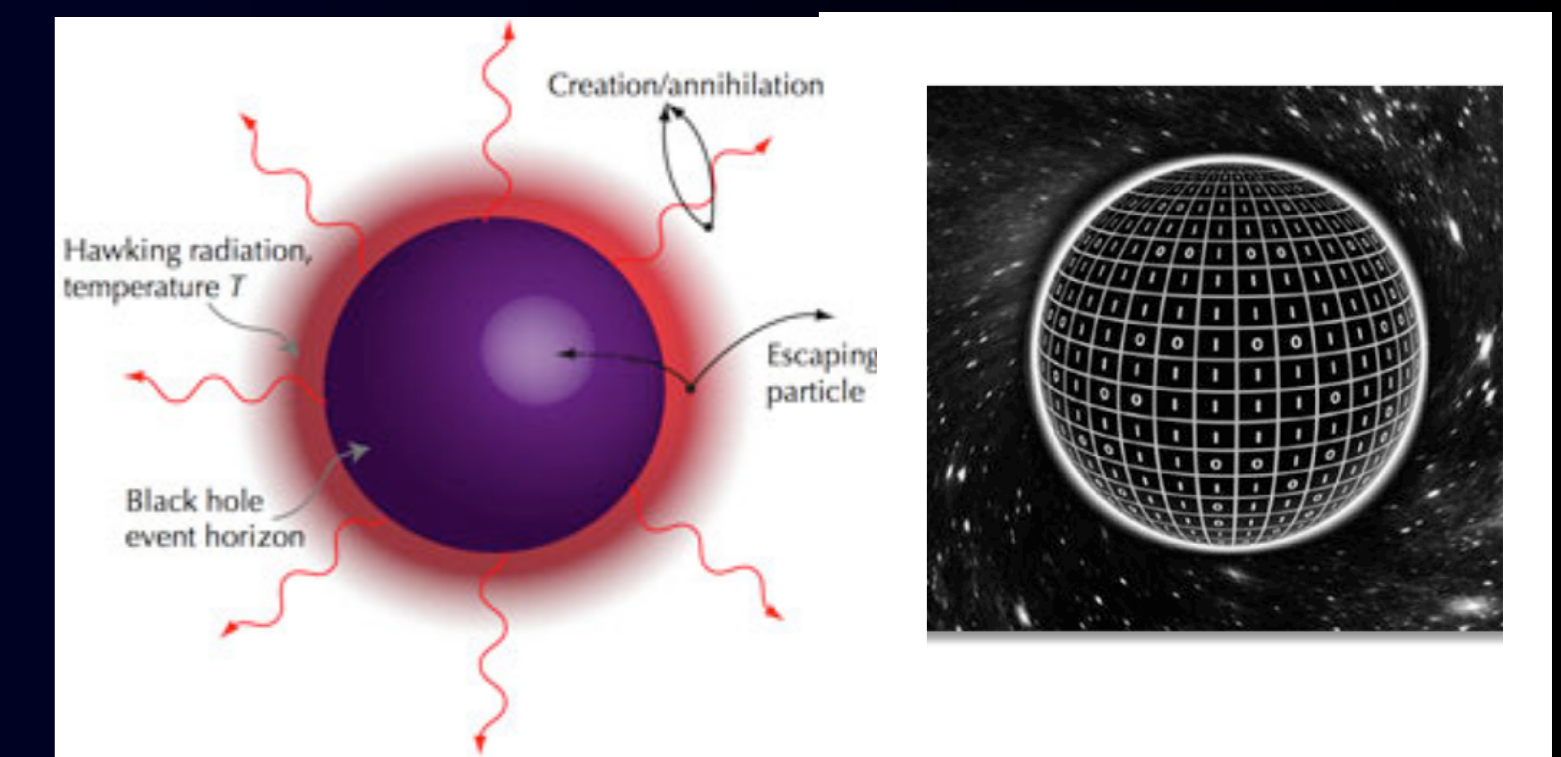
Agujeros negros cuánticos

A nivel cuántico, los agujeros negros emiten la denominada **radiación de Hawking**. Procede de la aparición cuántica de pares partícula-antipartícula virtuales en la proximidad del horizonte, cuando una partícula cae en el agujero negro, mientras que la otra escapa al infinito.

La radiación de Hawking tiene un espectro de cuerpo negro, con una **temperatura** inversamente proporcional a la masa del agujero negro. Asimismo, tiene asociada una **entropía** (de Bekenstein-Hawking) proporcional al área del horizonte. Estas propiedades permiten establecer una **Termodinámica de agujeros negros**. La interpretación estadística de la entropía sugiere la existencia de un enorme número de microestados cuánticos para cada solución de tipo agujero negro clásica.

La dependencia de la entropía con el área del horizonte, y no con el volumen que encierra, ha motivado la formulación del **principio holográfico**, que propone que la información sobre los estados cuánticos de un sistema gravitacional en una región están codificados en la superficie que rodea dicha región.

La radiación de Hawking conlleva la evaporación completa del agujero negro. El **problema de la información** es decodificar cómo la radiación de Hawking lleva la información de los objetos que lo formaron; en especial, de su entrelazamiento cuántico, que debe preservarse para la consistencia con las leyes de la Mecánica Cuántica.

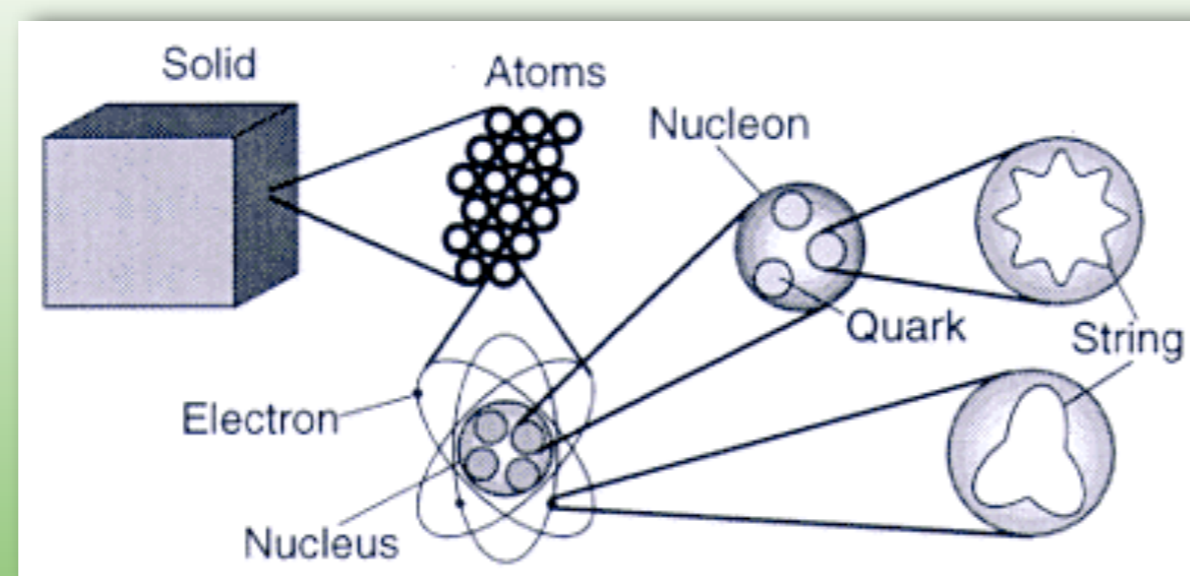


Gravedad y agujeros negros en teoría de cuerdas

La teoría de cuerdas propone que las partículas elementales no son puntuales, sino objetos extensos, cuerdas en diversos estados de vibración.

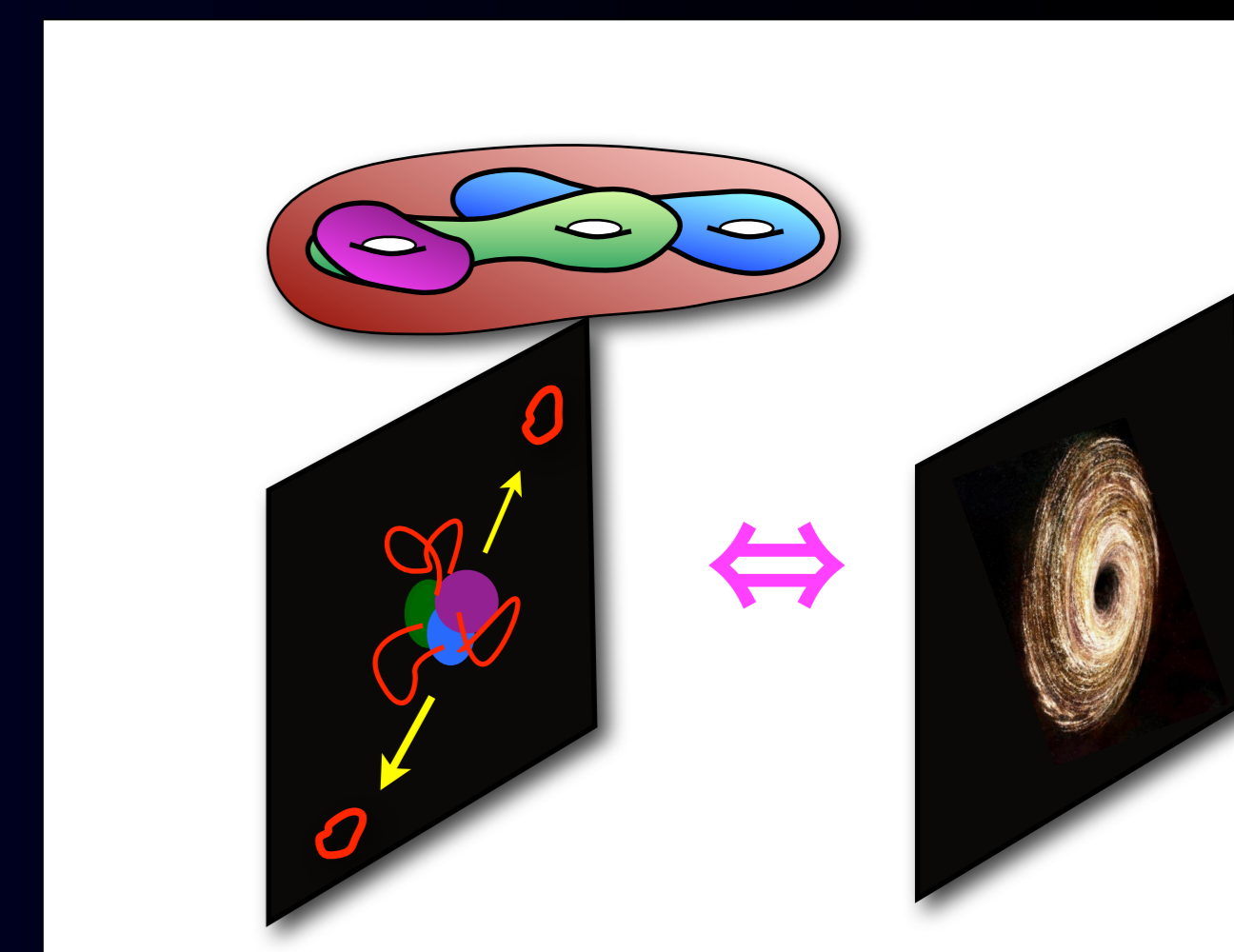
La teoría contiene la interacción gravitatoria, ya que el modo de vibración más ligero de una cuerda cerrada es el gravitón, el cuanto del campo gravitatorio.

Aunque aún no se ha comprobado experimentalmente, es de gran interés por ser una teoría cuántica que contiene la Relatividad General, además de otras interacciones.



Las teorías de cuerdas contienen determinados objetos extensos, las **D-branas**, que pueden enrollarse en las dimensiones extra para producir objetos muy masivos en el espacio-tiempo de cuatro dimensiones. Cuando las interacciones son intensas estos objetos se convierten en agujeros negros clásicos. Cuando las interacciones son pequeñas, están descritas por un sector de cuerdas abiertas con los extremos fijos en las D-branas. Los diversos estados de las cuerdas abiertas corresponden a los microestados cuánticos del agujero negro y permiten una **interpretación estadística de la entropía de Bekenstein-Hawking**.

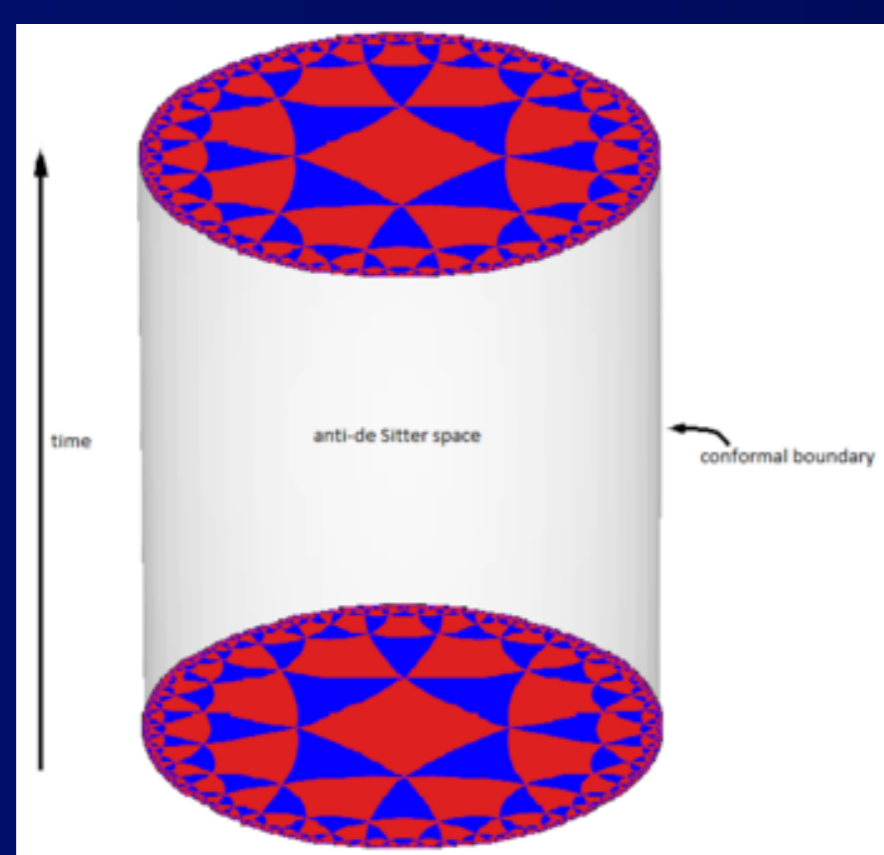
La **radiación de Hawking** corresponde a la emisión de cuerdas cerradas en procesos de interacción de las cuerdas abiertas



AdS/CFT y holografía

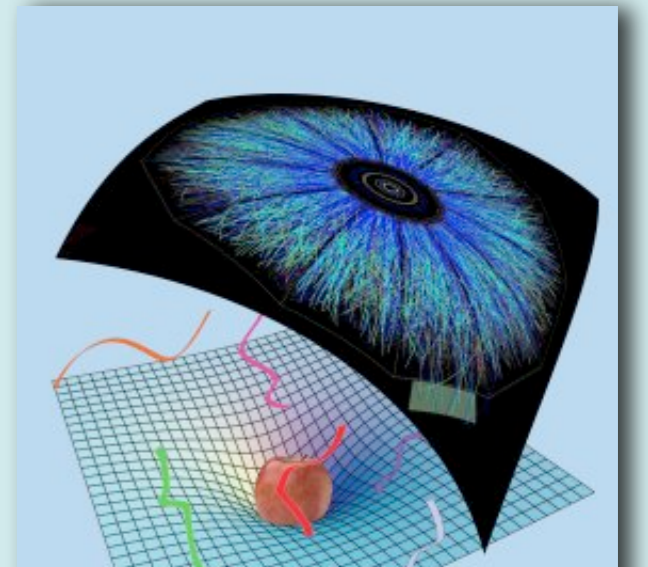
La doble descripción de las D-branas en términos de cuerdas abiertas o de campos gravitatorios permite una realización cuantitativa del **principio holográfico**. Concretamente implica la **correspondencia AdS/CFT**, una relación holográfica entre gravedad en un espacio-tiempo anti de Sitter (AdS) de 5 dimensiones y una teoría gauge conforme (CFT) en su frontera 4-dimensional.

Además de su importancia conceptual, la correspondencia AdS/CFT ha llevado a diversas **aplicaciones**:



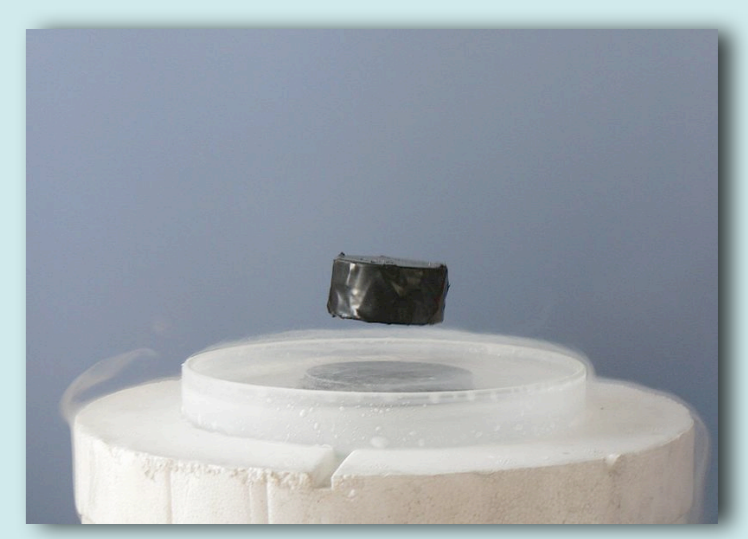
Plasma de quarks y gluones

A temperatura T, la teoría gauge se convierte en un plasma en interacción fuerte. Su dual gravitacional contiene un agujero negro con temperatura de Hawking T. AdS/CFT permite usar física de agujeros negros para modelizar las propiedades del plasma de quarks y gluones producido en colisiones de iones pesados en los experimentos RHIC y ALICE (en el LHC).



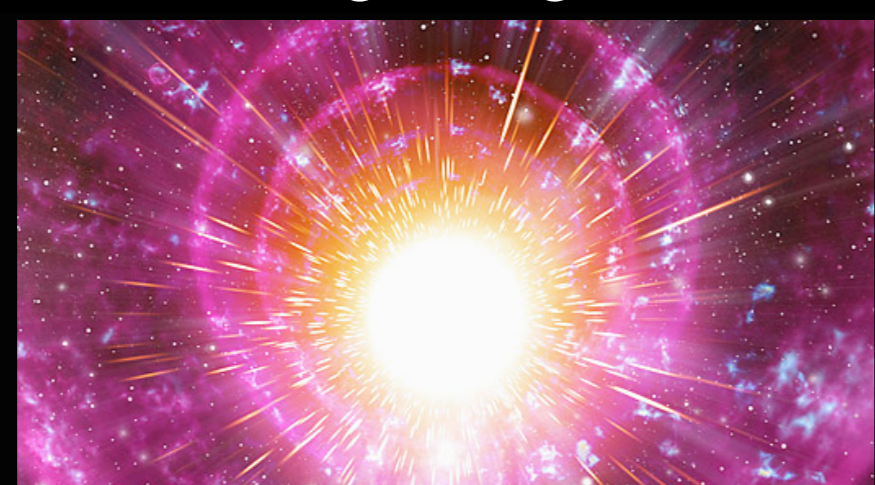
Superconductores holográficos

Un desarrollo reciente es la construcción de modelos gravitacionales duales holográficos de materiales superconductores (agujeros negros cargados en espacios AdS) y otros sistemas exóticos en materia condensada.



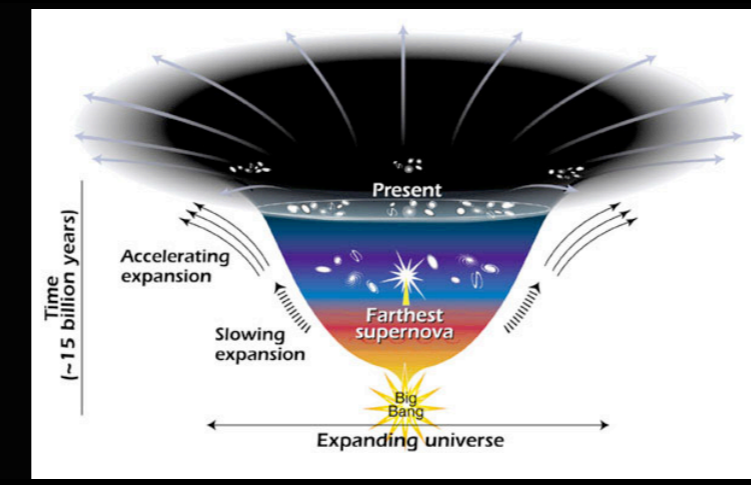
Misterios por resolver

Big Bang



El instante del Big Bang corresponde a una singularidad en la que se hace cero la distancia entre dos puntos cualesquiera del espacio. Los mecanismos para eliminar o describir este tipo de singularidades son objeto de una activa investigación.

Constante cosmológica



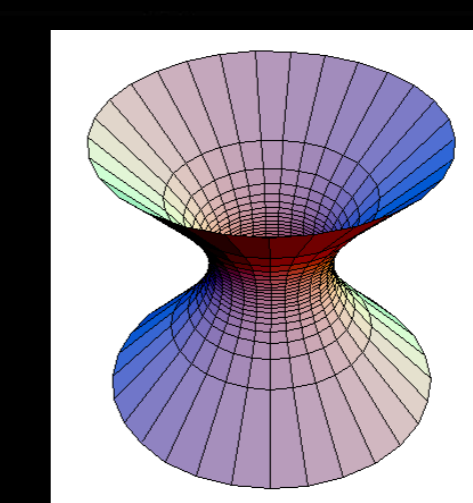
La energía oscura del Universo podría ser debida a una constante cosmológica. Sin embargo, aún no se comprende el origen de las abrumadoras cancelaciones de las correcciones cuánticas necesarias para explicar su pequeñísimo valor.

Caer en un agujero negro



Las descripciones disponibles de un agujero negro cuántico todavía no permiten responder a la pregunta de qué ocurre realmente cuando un observador cae dentro de su horizonte.

Espacio de Sitter



A pesar de su gran simetría, no se ha conseguido una formulación cuantitativa del principio holográfico en espacio-tiempos de tipo de Sitter (que describe el Universo en expansión exponencialmente acelerada).