

Stephen Hawking
Presentación del Profesor Stephen Hawking en la Decimoséptima
Conferencia Internacional sobre Relatividad General y Gravitación,
Dublín.

Traductor : *Liberto Brun Compte*
[Artículo Original en Inglés](#)

21 de julio, 2004

¿Pueden escucharme? Quiero informar que creo haber solucionado un gran problema en la física teórica que ha estado rondando desde que descubrí que los agujeros negros radian termalmente, hace treinta años. La pregunta es ¿Se pierde la información en la evaporación de un agujero negro? Si es así la evolución no es unitaria y los estados cuánticos puros, se descomponen en estados mixtos.

Le estoy agradecido a mi estudiante graduado Christophe Galfard por su ayuda en la preparación de esta conferencia.

La información de la paradoja sobre los agujeros negros, comenzó en 1967, cuando Werner Israel mostró que la métrica de Schwarzschild, era la única solución estática del vacío con agujeros negros. Esto fue generalizado entonces por el teorema de no pelo, la única solución de las ecuaciones de Einstein Maxwell son las métricas de Kerr Newman. El teorema de no pelo implicaba que toda la información acerca del cuerpo en colapso, se perdía desde la región exterior, aparte de tres cantidades conservadas, la masa, el momento angular y la carga eléctrica.

Esta pérdida de información no era un problema en la teoría clásica. Un agujero negro clásico duraría eternamente y la información podía pensarse que quedaba conservada dentro de él, pero no muy asequible. Sin embargo, la situación cambió cuando descubrí que los efectos cuánticos ocasionarían que un agujero negro radiase a un ritmo persistente. Al menos en la aproximación que estaba yo utilizando, la radiación del agujero negro sería totalmente térmica y no llevaría información. Así que, qué es lo que sucedería con toda la información encerrada en el interior de un agujero negro, que se evaporaba y desaparecía completamente. Parecía ser que la única manera como la información podía salir, sería si la radiación no fuese exactamente térmica, pero que tuviera correlaciones sutiles. Nadie ha encontrado un mecanismo para producir correlaciones, pero la mayoría de los físicos creen que alguna debe de existir. Si la información se perdiese en los agujeros negros, los estados puros del cuanto se descompondrían en estados mezclados y la gravedad del cuanto no sería unitaria.

Yo lancé primero la pregunta sobre pérdida de información en el 75 y el argumento continuo por años, sin ninguna resolución por ningún lado. Finalmente, se reclamó que el asunto había sido resuelto en favor de la conservación de la información por ADS, CFT. ADS, CFT, es una dualidad conjeturada entre la súper-gravedad del espacio anti de Sitter y una Teoría de Campo Conforme en las fronteras del espacio anti de Sitter en el infinito. Ya que la Teoría del Campo Conforme es manifiestamente unitaria, el argumento es que la súper-gravedad debe conservar la información. Cualquier información que cae en un agujero negro en el espacio anti de Sitter, debe de volver a salir. Pero aún no estaba claro como podía salir del agujero la información.

Esta es la pregunta a la que voy a referirme.

La formación y evaporación de un agujero negro puede pensarse como un proceso de interacción. Uno envía partículas y radiación desde el infinito y mide que es lo que sale hacia el infinito. Todas las mediciones se realizan al infinito, donde los campos son débiles y uno nunca sondea la región fuerte del campo en el medio. De manera que uno nunca puede estar seguro que se forma un agujero negro, no importa que tan cierto pueda esto ser en la teoría clásica. Mostraré que esta posibilidad, permite que se conserve la información y que sea regresada al infinito.

Adopto el acercamiento Euclidiano, la única manera sensata de manejar la gravedad cuántica no perturbativa. Así, la evolución temporal de un estado inicial está dada por una integral de caminos sobre todas las métricas positivas que van entre dos superficies, que están separadas una distancia T en el infinito. Entonces uno hace una rotación de Wick del intervalo de tiempo, T , al Lorentziano.

La integral de caminos es tomada sobre métricas para todas las topologías posibles que caben en medio de las superficies. Existe la topología trivial, la superficie inicial por el intervalo de tiempo. Después están las topologías no triviales que son todas las demás topologías posibles. La topología trivial puede ser foliada por una familia de superficies de tiempo constante. La integral de caminos de todas las mediciones con la topología trivial, puede tratarse canónicamente con secciones temporales. En otras palabras, la evolución temporal (incluyendo la gravedad) será generada por un Hamiltoniano. Esto dará un mapa unitario desde la superficie inicial a la final.

Las topologías no triviales, no pueden ser foliadas por una familia de superficies de tiempo constante. Existirá un punto fijo en cualquier campo vectorial de evolución temporal en una topología no trivial. Un punto fijo en el régimen Euclidiano, se corresponde a un horizonte en el Lorentziano. Un pequeño cambio en el estado de la superficie inicial, se propagaría como una onda lineal, sobre el fondo de cada métrica en la integral de caminos. Si el fondo contenía un horizonte, la onda caería a través de él y decaería exponencialmente en un tiempo posterior, fuera del horizonte. Por ejemplo, las funciones de correlación decaen exponencialmente en las métricas con agujeros negros. Esto significa que la integral de caminos sobre todas las métricas topológicamente no triviales, será independiente del estado de la superficie inicial. No se sumará a la amplitud para ir desde el estado inicial hasta el final, que proviene de la integral de caminos sobre todas las métricas topológicamente triviales. De manera que el mapa desde los estados iniciales a los finales, dado por la integral de caminos sobre todas las métricas, será unitario. Uno podría dudar el uso de este argumento, del concepto de un estado cuántico para el campo gravitacional, sobre una superficie spacelike inicial o final. Esto sería un funcional de las geometrías de superficies spacelike, lo cual no es algo que pueda medirse en campos débiles cerca del infinito. Uno puede medir los campos débiles gravitatorios, en un tubo timelike alrededor del sistema, pero las tapas de encima y de debajo, van a través del interior del sistema, donde los campos pueden ser fuertes.

Una forma de deshacerse de las dificultades de las tapas, sería unir la superficie final de regreso con la superficie inicial, e integrar todas las geometrías espaciales de la unión. Si esta fuese una identificación bajo un intervalo de tiempo Lorentziano, T , en el infinito, introduciría curvas timelike cerradas. Pero si el intervalo al infinito es la distancia Euclidiana, β , la integral de caminos proporciona la función de partición para la gravedad a la temperatura, uno sobre β .

La función de partición de un sistema, es la traza sobre todos los estados, pesados con $e^{-\beta H}$. Entonces se puede integrar β a lo largo de un contorno paralelo al eje imaginario, con el factor, $e^{-\beta E_0}$. Esto proyecta los estados con energía, E_0 . En un colapso gravitatorio y evaporación, uno está interesado en los estados de energía precisa, en vez de los estados de temperatura precisa.

Existe un problema de infrarrojo con esta idea para un espacio plano asintótico. La integral de caminos Euclidiana con período β , es la función de partición para espacio a temperatura, uno sobre β . La función de partición es infinita, porque el volumen del espacio es infinito. Este problema de infrarrojo puede resolverse por una pequeña constante cosmológica negativa. No afectará la evaporación de un agujero negro pequeño, pero cambiará el infinito a espacio anti de Sitter y hará finita la función de partición térmica.

La frontera en el infinito entonces es un toroide, S^1 , por S^2 . La topología trivial, periódicamente identificada como espacio anti de Sitter, llena el toroide, pero también lo hacen las topologías no-triviales, la más conocida de ellas siendo la Schwarzschild anti de Sitter. Mientras que la temperatura sea pequeña comparada con la temperatura de Hawking-Page, la integral de caminos sobre todas las métricas topológicamente triviales, representa radiación auto gravitante en el espacio asintótico de anti de Sitter. La integral de caminos sobre todas las métricas de la topología ADS de Schwarzschild representa un agujero negro y radiación térmica en el anti de Sitter asintótico.

La frontera en el infinito tiene topología S^1 por S^2 . La topología más simple que cabe dentro de estas fronteras, es la topología trivial, S^1 por D^3 , el tres-disco. La siguiente topología más simple y la primera topología no trivial, es S^1 por D^2 . Esta es la topología de la métrica de Schwarzschild anti de Sitter. Existen otras topologías posibles que caben dentro de las fronteras, pero estas dos son los casos importantes, métricas topológicamente triviales y el agujero negro. El agujero negro es eterno. No puede convertirse en topológicamente trivial más adelante.

En vista de esto, uno puede comprender porqué la información se conserva en las métricas topológicamente triviales, pero exponencialmente decae en métricas topológicamente no triviales. Un estado final de espacio vacío sin un agujero negro, sería topológicamente trivial y estaría foliado por superficies de tiempo constante. Estas formarían un tres-ciclo módulo frontera en el infinito. Cualquier simetría global conduciría a cargas globales conservadas en esos tres ciclos. Esto evitaría que las funciones de correlación decayesen exponencialmente en las métricas topológicamente triviales. En efecto, uno puede considerar la evolución Hamiltoniana unitaria, de una métrica topológicamente trivial como la conservación de la información a través de un tres-ciclo.

Por otra parte, una topología trivial, como un agujero negro, no tendrá un tres-ciclo final. Por lo tanto no conservará ninguna cantidad, que prevendría que las funciones de correlación decaigan exponencialmente. Así uno es conducido al maravilloso resultado, que las amplitudes de tiempo posterior de la integral de caminos sobre una métrica topológicamente no trivial, son independientes del estado inicial. Esto fue notado por Maldacena en el caso de anti de Sitter³ asintótico e interpretado como el hecho de implicar que la información se pierde en la métrica BTZ de agujeros negros. Maldacena fue capaz de demostrar que las métricas topológicamente triviales tienen funciones de

correlación que no decaen y tienen amplitudes del orden correcto para ser compatibles con una evolución unitaria. Sin embargo Maldacena no se dio cuenta de que desde un tratamiento canónico se sigue que la evolución de una métrica topológicamente trivial será unitaria.

Así que al final, todos tenían razón, de alguna manera. La información se pierde en métricas topológicamente no triviales, como el agujero negro eterno. Por otro lado, la información se conserva en las métricas topológicamente triviales. La confusión y paradoja vino porque la gente pensó de manera clásica, en términos de una sola topología para el espacio-tiempo. Era R^4 o un agujero negro. Pero la suma sobre historias de Feynman, permite que sea ambas a la vez. Uno no puede afirmar que topología contribuyó a la observación más de lo que uno puede decir qué ranura atravesó el electrón en el experimento de las dos ranuras. Todo lo que la observación en el infinito puede determinar, es que existe un mapa desde los estados iniciales, hasta el final y que esa información no se pierde.

Mi trabajo con Hartle, mostró que la radiación podría ser pensada como un escape del interior de un agujero negro. Por lo tanto era razonable suponer que podría llevar información hacia fuera del agujero negro. Esto explica como puede formarse un agujero negro y después ofrecer la información acerca de lo que hay adentro, mientras se mantiene topológicamente trivial. No existe un universo bebé ramificándose, como alguna vez pensé. La información permanece firmemente en nuestro universo. Lo siento por desilusionar a los seguidores de la ciencia-ficción, pero si la información se conserva, no existe la posibilidad de utilizar a los agujeros negros para viajar a otros universos. Si usted cae dentro de un agujero negro, su masa energía regresará a nuestro universo, pero de una manera dañada, que contiene la información acerca de lo que era, pero en un estado irreconocible.

Existe un problema en describir que es lo que pasa, por que estrictamente hablando, lo único observable en la gravedad cuántica, son los valores del campo en el infinito. Uno no puede definir el campo en un punto del medio, porque existe una incertidumbre cuántica en relación con el lugar donde se hace la medición. Sin embargo, en los casos en que existen un gran número, N , de campos de materia ligeros, acoplados a la gravedad, uno puede despreciar las fluctuaciones gravitatorias, porque sólo son una entre N lazos cuánticos. Uno puede entonces realizar la integral de caminos sobre todos los campos de materia, en una métrica dada, para obtener una acción efectiva que será un funcional de la métrica.

Uno puede agregar la clásica acción de Einstein Hilbert de la métrica, a esta acción efectiva cuántica de los campos de materia. Si uno integrase esta acción combinada sobre todas las otras métricas uno obtendría la teoría cuántica completa. Sin embargo, la aproximación semiclásica, es la de representar la integral sobre las métricas, por su punto de inflexión. Esto obedecería las ecuaciones de Einstein, donde la fuente es el valor de expectación del tensor de energía-momento, de los campos de materia en su estado de vacío.

La única manera de calcular la acción efectiva de los campos de materia, solía ser la teoría perturbativa. Esto no es factible que funcione en el caso del colapso gravitatorio. Sin embargo, ahora afortunadamente tenemos un método no-perturbativo en ADS CFT. La conjetura de Maldacena dice que la acción efectiva de un CFT en una métrica de

fondo es igual a la acción efectiva de la súper-gravedad del espacio anti de Sitter con esa métrica de fondo en el infinito. En el gran límite N , la acción efectiva de súper-gravedad es solamente la acción clásica. De ahí que el cálculo de la acción efectiva cuántica de los campos de materia, es equivalente a resolver las ecuaciones de Einstein clásicas.

La acción de un espacio anti de Sitter, con una frontera al infinito, sería infinita así que hay que regularizar. Uno introduce restas que dependen solo de la métrica de la frontera.

- El primer contrapunto es proporcional al volumen de la frontera.
- El segundo contrapunto es proporcional a la acción Einstein Hilbert de la frontera.
- Existe un tercer contrapunto, pero no está definido covariantemente.

Ahora uno agrega la acción Einstein Hilbert de la frontera y se busca un punto de inflexión de la acción total. Esto involucrará resolver las ecuaciones Einstein acopladas de cuatro y cinco dimensiones. Probablemente tenga que hacerse numéricamente.

En esta conferencia, he argumentado que la gravedad cuántica es unitaria y la información es mantenida en la formación y evaporación de agujeros negros. Considero que la evolución está dada por una integral de caminos Euclidiana sobre las métricas de todas las topologías. La integral sobre métricas topológicamente triviales puede hacerse dividiendo el intervalo de tiempo en delgadas secciones y utilizando una interpolación lineal a la métrica de cada sección. La integral sobre cada sección, será unitaria y así toda la integral de caminos será unitaria.

Por otro lado, la integral de caminos sobre métricas topológicamente no triviales, perderá información y será asintóticamente independiente de sus condiciones iniciales. Por lo tanto la integral de caminos será unitaria y la mecánica cuántica estará a salvo.

Es grandioso resolver un problema que me ha estado preocupando por casi treinta años, aunque la respuesta es menos apasionante que la alternativa que sugerí. Este resultado no es todo negativo, pues indica que un agujero negro se evapora, mientras permanece topológicamente trivial. Sin embargo, la gran solución N es probable que sea un agujero negro que se contrae hasta cero. Esto es lo que sugerí en 1975.

En 1997, Kip Thorne y yo, le apostamos a John Preskill, que la información se perdía en los agujeros negros. El perdedor o perdedores de la apuesta tienen que darle al ganador o ganadores una enciclopedia de su elección, de la cual pueda obtenerse información con toda facilidad. Ahora estoy listo para conceder la apuesta, pero Kip Thorne no está convencido del todo. Yo le daré a John Preskill la enciclopedia que pidió. John es un "all American", así que naturalmente quiere una enciclopedia sobre béisbol. Tuve muchas dificultades en conseguir una por aquí, así que le ofrecí una enciclopedia sobre críquet, como una alternativa, pero John no se dejó convencer de la superioridad del críquet. Afortunadamente mi asistente, Andrew Dunn, convenció a los editores de Sportclassic Books, a enviar por avión una copia de Total Baseball, The Ultimate Baseball Encyclopedia a Dublín. Le daré a John la enciclopedia ahora. Si Kip acepta reconocer la apuesta más tarde, puede devolvérmela.

Anti de Sitter es un modelo cosmológico para el Universo. Aquél que esté interesado en conocer más acerca de esto se le sugiere ver:

- http://www.fact-index.com/a/an/anti_de_sitter_space.html
- http://www.fact-index.com/d/de/de_sitter_space.html
- http://www.fact-index.com/a/au/automorphism_1.html

La función Lorentziana, puede verse en:

- <http://mathworld.wolfram.com/LorentzianFunction.html>

Los sistemas Hamiltonianos:

- <http://arxiv.org/abs/nlin.CD/0203048>
- <http://citebase.eprints.org/cgi-bin/citations?id=oai:arXiv.org:nlin/0203048>

Para el caso de los Schwarzschild anti de Sitter

- <http://citebase.eprints.org/cgi-bin/citations?id=oai:arXiv.org:hep-th/0205142>

Para saber más acerca de toroides (geometría del universo):

- <http://mathworld.wolfram.com/Torus.html>
- <http://zebu.uoregon.edu/~js/ast123H/lectures/lec16.html>

Fases de los “tres ciclos”:

- <http://www.iop.org/EJ/abstract/0741-3335/27/4/004>

Teoría de Feynman:

- <http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html>

Acción Einstein Hilbert:

- <http://relativity.livingreviews.org/Articles/lrr-1998-6/node16.html>

Covariante:

- <http://mathworld.wolfram.com/Covariant.html>