

# Agujeros Negros, Cuerdas y Gravedad Cuántica

Juan Maldacena  
Institute for Advanced Study  
School of Natural Sciences  
Einstein Drive  
Princeton, NJ, 08540, USA

Con licencia de Jefferson Laboratory of Physics  
Harvard University  
Cambridge, MA, 02138, USA

## Introducción

En este artículo vamos a describir algunas ideas sobre las leyes de la física más microscópicas o más fundamentales. Antes de eso vamos a resumir, en términos muy generales y simples, las leyes de la física tal como las entendemos hoy. Enfatizaremos que existe una importante inconsistencia lógica entre estas leyes: el conflicto entre la mecánica cuántica y la gravedad. La teoría de cuerdas fue inventada para resolver esta contradicción. Describiremos qué es la teoría de cuerdas y cómo describe algunas propiedades cuánticas de los agujeros negros. Esto será posible mediante la relación entre teoría de cuerdas y teorías más convencionales de física de partículas.

## La física tal como la conocemos hoy

### **¿De qué están hechas las cosas?**

Cuando nos preguntamos de qué están hechas las cosas, pensamos en moléculas, átomos o partículas elementales. La materia ordinaria está hecha de moléculas, que a su vez contienen átomos, que a su vez contienen más partículas elementales. Una partícula elemental es, por definición, una partícula que no está hecha de otras partículas. Podría ser que algún día se descubra que alguna de las partículas que hoy consideramos elementales estén hechas de otras partículas aun más elementales. Lo único que podemos decir es que hasta ahora los experimentos no han logrado observar que éstas estén compuestas por componentes más pequeñas. Consideremos por ejemplo, un pedazo de hierro. Está compuesto de átomos, estos átomos están compuestos de un núcleo y de un cierto número de electrones; 26 en el caso del hierro. Hasta donde conocemos hoy, los electrones son elementales. El núcleo contiene protones y neutrones, que a su vez contienen partículas llamadas "quarks," que son elementales. Todas estas partículas interactúan emitiendo y absorbiendo otras partículas. La fuerza electromagnética, responsable de mantener juntos a los átomos, se debe al intercambio de fotones. La fuerza fuerte, o fuerza nuclear, es responsable de mantener juntos a los quarks y junto al núcleo. Esta fuerza se debe al intercambio de otras partículas llamadas gluones. Toda la materia ordinaria que vemos a nuestro alrededor está compuesta de estas partículas. En resumen, tenemos un cierto número de partículas elementales, las anteriormente mencionadas y además algunas otras. Ellas componen toda la materia observable, incluyendo la materia en galaxias distantes, la materia que forma a los seres vivos, etc. En esta descripción de la materia, es extremadamente importante resaltar que las leyes que gobiernan su movimiento no son las leyes de la física clásica, sino las leyes de la mecánica cuántica. Nuestra intuición clásica nos diría que un electrón moviéndose alrededor del núcleo sería como un planeta moviéndose alrededor del sol. En ambos casos hay una fuerza atractiva, la fuerza gravitacional en un caso y

la fuerza eléctrica en el otro. Pero un electrón en movimiento emitiría ondas electromagnéticas, perdería energía y después de una fracción de segundo caería dentro del núcleo. ¿Por qué el electrón no cae en el núcleo? No cae gracias a la mecánica cuántica. En la mecánica cuántica las energías del sistema están cuantizadas, esto significa que el electrón solo puede tener energías bien definidas. Hay un estado de mínima energía y el electrón no puede decaer más emitiendo ondas electromagnéticas. En conclusión, la mecánica cuántica es crucial para la estabilidad de la materia. Es la razón por la que nosotros no nos caemos por el suelo al fondo de la tierra. En la mecánica cuántica, las partículas no tienen una posición y velocidad bien definidas. De hecho, cuando un electrón está en un estado de mínima energía no podemos determinar exactamente dónde se encuentra dentro del átomo. Es más probable encontrarlo cerca del núcleo que lejos de él. De tal forma que en la mecánica cuántica algunas cosas, como la posición del electrón, son un tanto indefinidas. La mecánica cuántica nos proporciona una forma precisa de caracterizar y describir ese aspecto indefinido.

## **Relatividad**

Otro aspecto importante en la descripción de la naturaleza es la íntima relación entre espacio y tiempo que resulta del principio de la relatividad. De acuerdo con el principio de la relatividad, cuando dos observadores se mueven a velocidad constante en relación el uno del otro, ambos observan las leyes de la física de la misma manera. Ven la luz propagándose a la misma velocidad. Esto es posible únicamente si el tiempo fluye de manera distinta para cada observador. Si alguien se moviera a gran velocidad con respecto a nosotros veríamos su reloj moviéndose más despacio. Esto es un efecto mínimo si nos movemos a velocidades ordinarias, pero es un gran efecto si nos movemos a velocidades cercanas a la velocidad de la luz. Por ejemplo, existen partículas que son inestables y decaen después de algún tiempo. En los aceleradores de partículas los físicos pueden hacer que estas partículas viajen muy rápidamente, a velocidades cercanas a la velocidad de la luz, y luego observar que estas partículas toman mucho más tiempo en decaer. El reloj se mueve más despacio para ellas. La relatividad implica que espacio y tiempo están relacionados. Así que es conveniente pensar en ellos como una única entidad, espacio-tiempo. Nuestro espacio-tiempo tiene cuatro dimensiones. Tiene tres dimensiones espaciales y una temporal. La relatividad también implica que la información no puede viajar más rápido que la velocidad de la luz.

## **Gravedad**

El último elemento en nuestra descripción de la naturaleza es la gravedad. A todos nos suena familiar la teoría de la gravedad de Newton, que establece que dos cuerpos masivos se atraen mutuamente mediante la fuerza gravitacional. Por esta razón los cuerpos caen, la tierra gira alrededor del sol, etc. De acuerdo con la teoría de Newton las fuerzas gravitacionales son instantáneas, de tal forma que si moviéramos al sol ahora, sentiríamos el cambio de la fuerza gravitacional inmediatamente aquí en la tierra. La relatividad, por otra parte, dice que la información no puede viajar más rápido que la luz. Así que si movemos al sol, sólo podríamos sentir el efecto en la tierra después de 8 minutos, el tiempo que le toma a la luz viajar del sol a la tierra. Einstein se dio cuenta de que había una contradicción entre la relatividad y la teoría de Newton y encontró una manera de resolverla. Su solución al problema representaba un salto conceptual enorme. Propuso que el espacio-tiempo puede ser curvo, que tiene alguna forma. Esta forma está determinada por la distribución de la materia. Las partículas se mueven a lo largo de trayectorias que son las líneas de menor longitud en este espacio-tiempo curvo. 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. La siguiente es una analogía. La descripción clásica del espacio-tiempo y las partículas moviéndose son como una

mesa de billar donde las bolas se mueven, golpeándose unas con otras, etc. Las bolas de billar se mueven pero la mesa es totalmente rígida y no se mueve. La teoría de Einstein es análoga a reemplazar la mesa de billar por una membrana elástica. Las bolas de billar modifican la forma de la membrana elástica. Si tenemos una bola de billar muy pesada deformaría más la membrana elástica y si tiramos otra bola, su trayectoria estaría determinada por la forma de la membrana elástica. De hecho, aun si no hubiera ninguna bola la membrana elástica oscilaría y las ondas se propagarían. Similarmente en el espacio-tiempo pueden haber ondas gravitatorias. Estas han sido medidas indirectamente y algunos experimentos actualmente se están llevando a cabo para verlas directamente. En resumen, el espacio-tiempo es dinámico, puede oscilar y moverse. La materia curva el espacio-tiempo y el movimiento de la materia depende de la forma del espacio-tiempo.

### **El problema**

Estas son las leyes de la física tal y como las conocemos hoy. Explican la mayor parte de fenómenos que vemos, incluyendo cómo los vemos. La biología y la química se reducen a interacciones de estas partículas. La mayor parte de la física hoy en día trata de aproximar estas leyes, desarrollando métodos para hacer cálculos con ellas, experimentalmente observando el comportamiento de diferentes configuraciones de partículas, observando cómo está distribuida la materia en el universo, etc.

Ambas teorías, la de interacción de las partículas cuánticas descrita anteriormente y la teoría de la gravedad, han sido probadas con un grado de extrema precisión por medio de experimentos. De tal forma que es sorprendente darse cuenta que estas leyes son inconsistentes. ¡Pero sí, son matemática y lógicamente inconsistentes! En la práctica esto significa que existen procesos, o situaciones físicas, que no podemos explicar utilizando estas leyes. El problema deviene del hecho que la teoría de la gravedad no es consistente con la mecánica cuántica, que es un componente crucial para nuestro entendimiento de la materia. ¿Por qué esta contradicción no es aparente en los experimentos que se realizan? La razón es que la mecánica cuántica es importante para pequeñas cosas y despreciable para cosas grandes y pesadas. Por otra parte la gravedad es importante para cosas pesadas. La mayoría de los objetos son, o pequeños y livianos, como los átomos, las partículas elementales, etc. donde la gravedad es despreciable, o son grandes y pesados, como nosotros mismos, los planetas, etc., donde podemos despreciar la mecánica cuántica. Todos los experimentos que se hacen hoy en día involucran situaciones donde la gravedad es despreciable o la mecánica cuántica es despreciable. Si tenemos un objeto pequeño y pesado necesitamos una nueva teoría para describirlo, una teoría que concilie la mecánica cuántica y la gravedad. Dicha teoría se denomina "gravedad cuántica." El problema más importante, donde surge algo pequeño y pesado, es en el inicio del universo. Hay gran cantidad de evidencia que demuestra que el universo se está expandiendo. Así que si fuéramos hacia atrás en el tiempo el universo aparecería cada vez más pequeño hasta encontrarse concentrado en una región muy pequeña. El universo completo es obviamente pesado, así que tenemos un objeto pequeño y pesado y por lo tanto los efectos de la gravedad cuántica serían importantes. La pregunta es cómo describir este proceso para explicar lo que sale de él, por qué el universo es como es, etc. Es crucial entender la gravedad cuántica para entender este proceso. La gravedad cuántica, sin embargo, no ha sido aun entendida suficientemente como para poder descifrar este problema. Existe otro problema donde la gravedad cuántica es relevante y en donde se ha hecho bastante progreso recientemente. El problema consiste en entender los aspectos cuánticos de los agujeros negros. Si tratáramos de hacer un objeto pequeño y pesado poniendo mucha materia en una región pequeña, nos encontraríamos que colapsaría en un agujero negro. Existe evidencia que esto efectivamente sucede en estrellas masivas, que colapsan por su propio

peso. Cuando un agujero negro se forma, una región de alta curvatura se desarrolla y es allí donde las teorías actuales fallan. Esta región, sin embargo, está rodeada por un horizonte, que es una superficie que separa el interior del exterior de manera tal que algo en el interior nunca podría escapar al exterior. La superficie del horizonte tiene determinado tamaño. Este tamaño es aproximadamente de un kilómetro para un agujero negro de la masa de una estrella típica. De acuerdo con la teoría de Einstein, la presencia del horizonte implica que nunca se verá la región de gran curvatura desde afuera, y que independientemente de lo que pase dentro nada escapará hacia fuera. Por otra parte, la mecánica cuántica implica que algo de la energía que cae dentro del agujero negro efectivamente se escapa hacia fuera. El agujero negro emite radiación con una temperatura característica. En los agujeros negros que se han visto en el universo esta radiación es muy débil para poder ser detectada, la temperatura es muy baja. Un agujero negro en un espacio vacío eventualmente perdería su masa debido a esta radiación. En una primera aproximación esta radiación parece no estar relacionada con lo que cayó en el agujero negro, pero de acuerdo con la mecánica cuántica la radiación debería conservar la información sobre los objetos que cayeron dentro del agujero negro. En principio, la teoría cuántica completa debería permitirnos calcular lo que sale de un agujero negro. Veamos la siguiente analogía. Supongamos que tenemos una estrella. Si conociéramos todo el estado cuántico de la estrella sabríamos todas las propiedades de la radiación que emite. En la práctica es muy difícil saber el estado cuántico de un sistema de muchas partículas, no digamos de una estrella. En el caso de un agujero negro, toda la información sobre su estado cuántico parece haber caído dentro del horizonte, así que aparentemente no podemos saberlo ni siquiera en principio. El hecho de que la mecánica cuántica establezca que necesitamos la información y que la gravedad establezca que no la podemos tener, porque está detrás del horizonte, se denomina la "paradoja de la información". Veremos cómo la gravedad cuántica resuelve esta paradoja. En conclusión, las teorías actuales de la física no son consistentes. Sin embargo, podemos utilizarlas para explicar casi todo excepto procesos como la creación del universo y algunos aspectos de la evolución de agujeros negros. Para esto necesitamos una teoría mejor.

## **Teoría de Cuerdas**

### **El problema con la gravedad cuántica**

Antes del siglo XX únicamente existía la física clásica. A principios del siglo XX la relatividad y la mecánica cuántica fueron descubiertas. Durante dicho siglo se entendió cómo conciliar la relatividad y la mecánica cuántica dentro de la teoría moderna de física de partículas. En 1915 Einstein hizo esto con la llamada "teoría de la relatividad general." La física clásica describe partículas moviéndose en un espacio-tiempo fijo. La física cuántica describe partículas borrosas, partículas que no tienen una posición bien definida en un espacio-tiempo fijo. La relatividad general describe las partículas moviéndose en un espacio-tiempo que se mueve. Una teoría completa sobre la naturaleza debe incorporar ambos puntos de partida, desde la física clásica, la mecánica cuántica y la relatividad general. Esta teoría completa es la teoría de la gravedad cuántica. Los primeros intentos en tratar de conciliar la teoría de la gravedad de Einstein junto con la mecánica cuántica fallaron. Los procedimientos de cálculos más sencillos que funcionan en el caso de la física de partículas daban respuestas infinitas que no tenían sentido alguno. En la década de 1970 nació la teoría de cuerdas. Aun cuando nació como un intento por entender la fuerza fuerte, fue obvio que esta teoría lo que realmente hacía era describir la gravedad y que podría ser utilizada para resolver la contradicción entre la mecánica cuántica y la gravedad. Es realmente una teoría en construcción y no hemos entendido todas las leyes que la gobiernan, pero sí hemos entendido

muchas de ellas. Provee una descripción unificada de todas las interacciones. Puede explicar los efectos cuánticos de los agujeros negros, y en eso es en b que nos concentraremos ahora.

### **Idea Básica**

La manera en que las teorías normales son cuantizadas es partiendo de una configuración simple; en este caso podría ser un espacio-tiempo plano y luego considerar pequeñas desviaciones o pequeñas excitaciones a su alrededor. Las pequeñas excitaciones de un espacio-tiempo plano y vacío son ondas gravitacionales. De acuerdo con las leyes de la mecánica cuántica la energía que estas ondas llevan son cuantificadas. La onda que lleva la mínima cantidad de energía, el cuanto de energía, puede ser vista como una partícula. En el caso de las ondas gravitacionales esta partícula se denomina gravitón. En teorías cuánticas normales esta partícula es puntual. En teoría de cuerdas reemplazamos las partículas por cuerdas. Las cuerdas son objetos unidimensionales. Podemos visualizarlos como cintas de goma microscópicas. Estas cuerdas pueden oscilar sin fricción, a diferencia de las cintas de goma. La energía de las oscilaciones de las cuerdas está cuantizada, como las de cualquier otro sistema mecánico cuántico. La cuerda con la menor energía posible de oscilación es el gravitón, siendo este carente de masa ya que la mínima energía de oscilación es cero. Partículas carentes de masa siempre viajan a la velocidad de la luz. Esto coincide con el hecho que las ondas gravitacionales también se mueven a la velocidad de la luz. Las cuerdas que tienen más energía oscilatoria se consideran como partículas masivas. Diferentes partículas serían cuerdas que oscilan de diferente manera. Estas cuerdas interactúan por medio de interacciones donde se dividen y se unen unas con otras. Así, dos cuerdas pueden unirse para formar una sola cuerda. Estas interacciones nos llevan a una teoría consistente. Existen fórmulas matemáticas precisas detrás de esta afirmación. El resultado de los cálculos utilizando estas formulas son razonables, es decir que no obtenemos respuestas infinitas. A grandes distancias se observarían las cuerdas como objetos puntuales. Debido a que experimentalmente no hemos visto ninguna cuerda en una partícula conocida concluimos que el tamaño de estas cuerdas vibrantes debería ser menor que la distancia más corta que podemos comprobar con los experimentos actuales, que es aproximadamente 10-18 metros. Se ha estudiado ampliamente la explicación más precisa de cómo las cuerdas pueden tener propiedades similares a las propiedades de las partículas elementales que conocemos hoy en día.

### **Agujeros Negros**

Dijimos que los agujeros negros surgen cuando ponemos muchas partículas juntas en un espacio muy pequeño. Debido a que las partículas son cuerdas, decimos que los agujeros negros son una colección de cuerdas juntas. El problema con este cuadro es que es muy difícil determinar cómo se comporta una colección tan grande de cuerdas interactuantes. Así que aun cuando se ha sabido por mucho tiempo que las cuerdas describen la gravedad cuántica, fue sólo recientemente que se hicieron cálculos concretos que describen aspectos cuánticos de agujeros negros. El progreso en años recientes fue posible gracias al desarrollo de nuevas formas de estudiar la teoría de cuerdas. Vamos a describir ahora una de las nuevas descripciones de la teoría de cuerdas. Imaginemos que tenemos un objeto, que puede ser un agujero negro, una estrella normal, una onda gravitatoria, o cualquier otro objeto. Lo rodeamos por una superficie imaginaria que está muy lejana al objeto. La idea es que tenemos dos formas de describir lo que sucede adentro. Una es la forma tradicional que describimos anteriormente, por medio de cuerdas, gravedad cuántica, etc. La segunda es considerando que tenemos una teoría de partículas que se mueve en la esfera imaginaria que está lejos. Esta teoría de partículas se denomina "teoría de la frontera". Así podemos describir cualquier

objeto en el interior, incluyendo agujeros negros, como excitaciones en la teoría de la frontera. De tal forma que traducimos el problema de tratar de entender agujeros negros al problema de entender ciertas configuraciones especiales en la teoría de la frontera. ¿Cuál es la ventaja? Primero, sabemos que las teorías de partículas comunes conservan la información, de ahí que los agujeros negros deban conservar la información también. Segundo, en algunos casos es posible hacer cálculos concretos en la teoría de la frontera que explican algunos de los aspectos cuánticos de los agujeros negros. Esta teoría de la frontera es realmente una descripción adecuada para espacios-tiempos especiales que tienen una superficie natural. El ejemplo más simple es un espacio curvo negativo con curvatura constante. El espacio positivo curvo más simple que podemos imaginar es una esfera. Si agregamos tiempo obtenemos el espacio-tiempo positivo curvo más simple, el cual se denomina "de Sitter" en honor a su descubridor. El espacio tiempo curvo negativo más simple es denominado anti-de Sitter. Este espacio-tiempo es estático, no se expande ni se contrae (a diferencia del espacio-tiempo en expansión que describe el universo). Que tenga una frontera sólo significa que existe una región lejana donde la luz puede ir y regresar en un tiempo finito de modo que parece como que si tuviera una superficie donde se refleja. La teoría de partículas en la frontera es más bien una teoría de partículas convencional, del tipo que creemos entender bastante bien, al menos conceptualmente. De tal manera que uno está reemplazando el problema complicado de cuantizar la gravedad por el problema de entender una teoría de partículas particular que se encuentra en la frontera del espacio-tiempo.

Esta descripción de la física en el interior en términos de una teoría de la frontera es análogo a la forma como funciona un holograma. Un holograma es una imagen que se ve tridimensional pero que se conserva en una placa fotográfica bidimensional. No obstante, logra codificar la información tridimensional completa de un objeto tridimensional. Nuestra teoría de la frontera, que habita en la superficie tridimensional del espacio tiempo, codifica la información en cuatro dimensiones completa de un objeto en un espacio-tiempo de cuatro dimensiones.

### **¿Dónde nos encontramos? ¿Hacia dónde vamos?**

Permitámonos resumir un poco el estado actual de la teoría de cuerdas. En la década de 1970 la teoría de cuerdas fue descubierta como una teoría posible para la fuerza fuerte. Luego se comprendió que podría ser utilizada para describir la gravedad cuántica. Pero por algún tiempo muy pocos físicos trabajaban en esta área. A mediados de la década de 1980 algunos cálculos demostraron que la teoría pasaba exámenes matemáticos de consistencia muy estrictos y que era una teoría viable para describir todas las interacciones en forma unificada. Esto causó un gran interés y hubo más actividad en esta área de estudio. Algunos físicos, sin embargo, consideraron que las ideas eran muy especulativas y fueron poco entusiastas al respecto. A mediados de la década de 1990 muchos resultados interesantes fueron encontrados; se entendió que la teoría de cuerdas era parte de una teoría más amplia denominada Teoría M que admite muchas descripciones equivalentes. Todas las teorías conocidas y consistentes de la gravedad cuántica eran límites especiales para la misma teoría. Esta teoría contiene también otros objetos tales como membranas. La comprensión de estos objetos condujo a las teorías de agujeros negros antes descritas. A la fecha, uno de los mayores problemas aun no resueltos es entender la teoría de cuerdas, o la Teoría M, en espacios-tiempo que describen situaciones cosmológicas, espacios-tiempo en expansión. Comprender estos espacios-tiempo nos llevaría a la resolución de la singularidad del big bang y podría explicar el principio del universo. Una de las lecciones del problema de los agujeros negros es que es bueno utilizar otra descripción donde el espacio tiempo surge de manera dinámica, como una aproximación. La singularidad de agujeros negros es similar en algunos aspectos a la singularidad del big bang. Así que la mejor

comprensión de agujeros negros probablemente conduciría a la mejor comprensión de la cosmología. Terminemos haciendo una comparación. Einstein vio que la teoría de Newton y la relatividad eran inconsistentes. Le llevó alrededor de diez años obtener una solución consistente. Podría argumentarse que esta teoría de relatividad general nació al tratar de resolver esta contradicción y que en ese momento no había muchos datos experimentales. Más adelante se realizaron experimentos que comprobaron esta teoría de manera impresionante. Los físicos de teoría de cuerdas estamos tratando de hacer algo parecido. Estamos tratando de resolver una contradicción similar. Desgraciadamente no tenemos experimentos que nos guíen. Sin embargo, tenemos la esperanza que una vez encontremos la solución, esta teoría será la teoría correcta que describirá la naturaleza. El problema es más complejo, ha tomado más de 20 años, con mucha gente trabajado en este tema, llegar hasta donde nos encontramos hoy. Se ha progresado mucho, pero aun hay mucho trabajo por hacer.

### **Reconocimientos**

La investigación de J.M. fue financiada en parte por el DOE grant DE-FG02-91ER40654, NSF grant PHY-9513835, la Sloan Foundation y la David and Lucile Packard Foundation.

### **Bibliografía**

Un libro que explica teoría de cuerdas para el público general es el escrito por Brian Greene denominado, "The Elegant Universe," W.W. Norton & Company, 1999.

Otros artículos sobre teoría de cuerdas son los siguientes:

E. Witten, "Reflections on the Fate of Space-time," Physics Today, Vol. 49, No. 4, páginas 24-30; abril 1996.

E. Witten, "Duality, Space-time and Quantum Mechanics," Physics Today, Vol. 50, No. 5, páginas 28-33; mayo 1997.

M. Duff, "The Theory Formerly Known as Strings," Scientific American, febrero 1998.

Una pagina de la web describiendo teoría de cuerdas es

<http://superstringtheory.com>

Libros más técnicos que describen la teoría de cuerdas son los siguientes.

Green, Schwarz y Witten, "Superstring Theory," Vol 1,2, Cambridge University Press

Polchinski, "String theory," Vol 1,2, Cambridge University Press.