

Un libro para entender el fascinante
y complejo mundo de la gravedad
cuántica, uno de los mayores
retos de la Física del siglo XXI.

GRAVEDAD CUÁNTICA DE LAZOS

para todos

RODOLFO GAMBINI
JORGE PULLIN

Lectulandia

Gravedad cuántica de lazos para todos es un libro valiente, desde su título hasta sus conclusiones. Como a menudo ocurre con las obras sencillas, pensadas para una mayoría, permite un disfrute individual que te sorprende y te empuja a una lectura cómplice que se te antoja breve. Al final, tu duda es si esta brevedad es una mera observación tuya (y, por tanto, relativista) o es propia de un instante indisoluble (y, por ello, sospechosamente cuántica). Ambas posibilidades colaboran en una complicidad placentera.

Rodolfo Gambini & Jorge Pullin

Gravedad cuántica de lazos para todos

ePub r1.0

Un_Tal_Lucas 29-01-2022

Rodolfo Gambini & Jorge Pullin, 2021

Editor digital: Un_Tal_Lucas
ePub base r2.1

Queremos agradecer a Iván Agulló, Fernando Barbero, Guillermo Mena, Lee Smolin y Thomas Thiemann sus comentarios sobre la versión inglesa del libro y a Iván Agulló, Javier Olmedo y Guillermo Mena por sus comentarios sobre esta versión.

PREFACIO

Este libro surgió a raíz de un curso de introducción al tema que uno de nosotros impartió en *EdX.org* (en castellano) y quiere suponer una introducción, comenzando de cero y sin fórmulas, a todos los conceptos necesarios de la relatividad general y la mecánica cuántica. Describirá la gravedad cuántica de lazos y dos de sus aplicaciones, una en la cosmología y otra relativa a los agujeros negros. Para hacer los temas lo más accesibles que se pueda, el estilo será ligero y conciso.

Esta teoría que aquí abordamos no es ajena a la controversia. No nos alejaremos de la misma y esbozaremos cuales son los problemas que algunos tienen con ella. Esperamos que los lectores puedan disfrutar de esta presentación y terminar la misma con una comprensión del estado de la cuestión.

Rodolfo Gambini y Jorge Pullin,
Montevideo, octubre de 2020.

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

La Gravedad cuántica de lazos es una de las principales propuestas tendientes a unificar la teoría de la relatividad general de Einstein y la mecánica cuántica, proporcionando así una teoría cuántica de la gravedad. Si estas palabras no significan mucho para ti, no te preocupes, las definiremos en términos simples en los capítulos que siguen. La palabra en la que nos queremos concentrar aquí es «controversia». ¿Qué quiere decir esta palabra en el contexto de la ciencia? Quiere decir que vamos a estar discutiendo ciencia incompleta. No existe un consenso entre los físicos acerca de cómo «cuantizar» la gravedad. Existen propuestas, sí, pero son incompletas. No está claro si estas son consistentes y si predicen la física correctamente. Dos de las propuestas son seguidas por la mayoría de los físicos, son la teoría de cuerdas y la que discutiremos en este libro, la Gravedad cuántica de lazos. La cantidad de físicos que están involucrados en estos esfuerzos en el mundo es de cientos. Es difícil dar un número preciso porque algunos físicos trabajan intermitentemente en distintos temas, pero para dar una idea, ambos campos organizan conferencias mundiales cada cierto tiempo que atraen a más de 200 físicos cada una.

También tenemos que mencionar que, por el momento, no conocemos un solo fenómeno físico observable o experimento que requiera de una teoría cuántica de la gravedad para explicarlo. Esto genera la pregunta: ¿para qué preocuparse entonces? Hay dos razones. La primera es la necesidad de unidad y consistencia de la física. Sabemos que todas las otras interacciones (la electromagnética, la débil y la fuerte) requieren de la mecánica cuántica para describir correctamente la naturaleza. La razón de esto es que estas

interacciones son importantes a nivel microscópico y sabemos que a ese nivel las cosas son de naturaleza cuántica. La gravedad es solo importante a nivel macroscópico, como en los objetos astronómicos, y ahí los efectos cuánticos son despreciables^[1]. La segunda razón es que no sabemos cómo acoplar consistentemente teorías clásicas y cuánticas. Como veremos, la mecánica cuántica tiene propiedades contraintuitivas. Una de ellas es que las cantidades físicas no tienen valores hasta que son medidas. No es que uno ignore los valores hasta que los mide, simplemente no existen. ¿Cómo puede uno acoplar tal tipo de teorías con una teoría clásica donde las cantidades físicas deben tener valores todo el tiempo?

Uno podría pensar que no tener experimentos o fenómenos que explicar deberían hacer muy fácil construir teorías de la gravedad cuántica. Después de todo uno no tiene por qué estar limitado por experimentos que pudieran descartar las teorías propuestas. Sin embargo, esto ha resultado ser algo muy difícil de hacer. La razón es que, como veremos, la teoría de la relatividad general de Einstein describe a la gravedad no en términos de una fuerza como las de las otras interacciones, sino como una deformación del espacio-tiempo. Esto hace a la gravedad muy diferente de las otras tres interacciones. Por esto no sorprende que presente desafíos únicos cuando se la intenta cuantizar y, la experiencia previa cuantizando las otras tres interacciones no ayuda necesariamente.

En este libro comenzaremos intentando presentar una descripción auto-contenida de los intentos hechos por la Gravedad cuántica de lazos para cuantizar la gravedad. En el capítulo dos introduciremos la teoría de la relatividad general de Einstein. En el tres introduciremos la mecánica cuántica. En el capítulo cuatro presentaremos a la Gravedad cuántica de lazos. Los capítulos 5 y 6 serán sobre aplicaciones, en cosmología y agujeros negros. En el capítulo 7 discutiremos las Espumas de Espín. El capítulo 8 habla de posibles consecuencias observacionales. Y, por último, en el capítulo 9 llegaremos a la conclusión, e incluiremos una discusión de las controversias que rodean a la teoría.

Capítulo 2

GRAVITACIÓN

En este capítulo hablaremos de la teoría de la relatividad general de Einstein. Pero para dar un poco de contexto, demos un paso hacia atrás y hablemos de las otras interacciones fundamentales que existen en la naturaleza. La interacción más conocida es la electromagnética.

En el siglo XIX, James Clerk Maxwell unificó los fenómenos eléctricos y magnéticos en una sola teoría, en la que, además, predijo la existencia de ondas electromagnéticas. Ejemplos de interacciones electromagnéticas son la fuerza que mantiene unido un imán a la puerta de un refrigerador o las fuerzas electrostáticas que hacen que un film adherente se pegue a un contenedor en la cocina. La existencia de las ondas electromagnéticas fue verificada unos pocos años después de la predicción de Maxwell, y, otros pocos años después, Marconi las usaba para transmitir radio a través del Atlántico.

Así, el electromagnetismo tiene muchas aplicaciones prácticas. También se reconoció que la luz es una onda electromagnética y, como consecuencia, la teoría explicaba también los fenómenos ópticos. Esta es pues, indudablemente, una teoría muy exitosa.

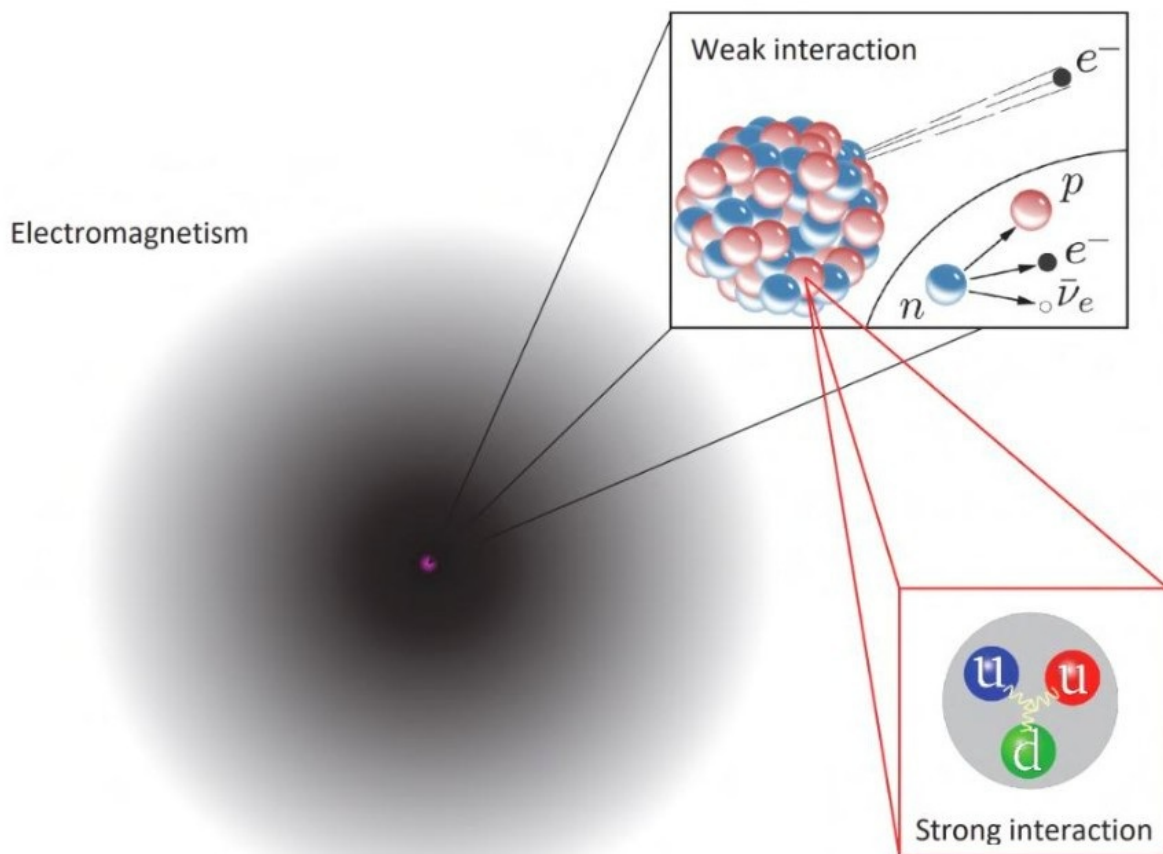


Figura 2.1: Las interacciones electromagnéticas, fuertes y débiles y sus roles en los átomos. (Crédito: Ng Kah Fee).

Las otras interacciones son la débil y la fuerte. Estas no tienen efectos visibles en la vida cotidiana. La interacción fuerte es responsable de que las partículas que componen los núcleos atómicos se mantengan juntas. Los núcleos están formados por protones y neutrones. Los protones tienen carga eléctrica positiva y por ende se repelen entre sí. La interacción fuerte contrarresta esa repulsión. La interacción débil es responsable del decaimiento radiactivo de átomos, no se manifiesta en la vida cotidiana, pero es muy importante en astrofísica, en particular en la producción de los elementos que componen la materia.

Las interacciones fuertes, débiles y electromagnéticas están todas descritas por una clase de teorías conocidas como teorías de Yang-Mills, en honor de Chen Ning Yang y Robert Mills, que las introdujeron en los años 60 del siglo xx. Las teorías de Yang-Mills son generalizaciones del electromagnetismo de Maxwell y consideran varios campos eléctricos y magnéticos que interactúan entre sí. Las mencionamos porque jugarán un rol importante en el desarrollo de la gravedad cuántica de lazos.

La última interacción fundamental es la gravedad.

La teoría de la gravedad que todos conocemos es la que introdujo Newton en 1666, y que dice que los objetos se atraen mutuamente con una fuerza proporcional a las masas e inversamente proporcional a la distancia al cuadrado. La familiaridad que le tenemos a veces nos hace pasar por alto el imponente logro intelectual que es la teoría de Newton. Unifica fenómenos tan dispares como la caída de una manzana de un árbol y el movimiento de la Luna alrededor de la Tierra y de esta última alrededor del Sol. La teoría es enormemente eficaz al explicar los movimientos en el Sistema Solar.

Pero Einstein notó que había un problema con la teoría de Newton. Predice que la gravedad se propaga instantáneamente, la fórmula de la fuerza solo depende de la distancia a la fuente. Si la distancia cambia, la fuerza cambia inmediatamente. Einstein había notado que nada puede viajar más rápido que la luz y eso requería modificar la teoría de Newton. Esta tampoco podía explicar completamente la dinámica del Sistema Solar. Las órbitas de los planetas tienen forma de elipse, con el Sol en uno de sus focos, pero es una elipse que rota. La velocidad de rotación es mayor para los planetas más cercanos al Sol. Para Mercurio, el planeta más cercano al Sol, la rotación es de unos 500 segundos de arco (menos de un grado) por siglo. La teoría de Newton explicaba casi todo ese valor, pero le faltaban 40 segundos de arco por siglo. Estos serían explicados por una nueva teoría de la gravedad que Einstein introdujo en 1915, llamada la teoría de la relatividad general.

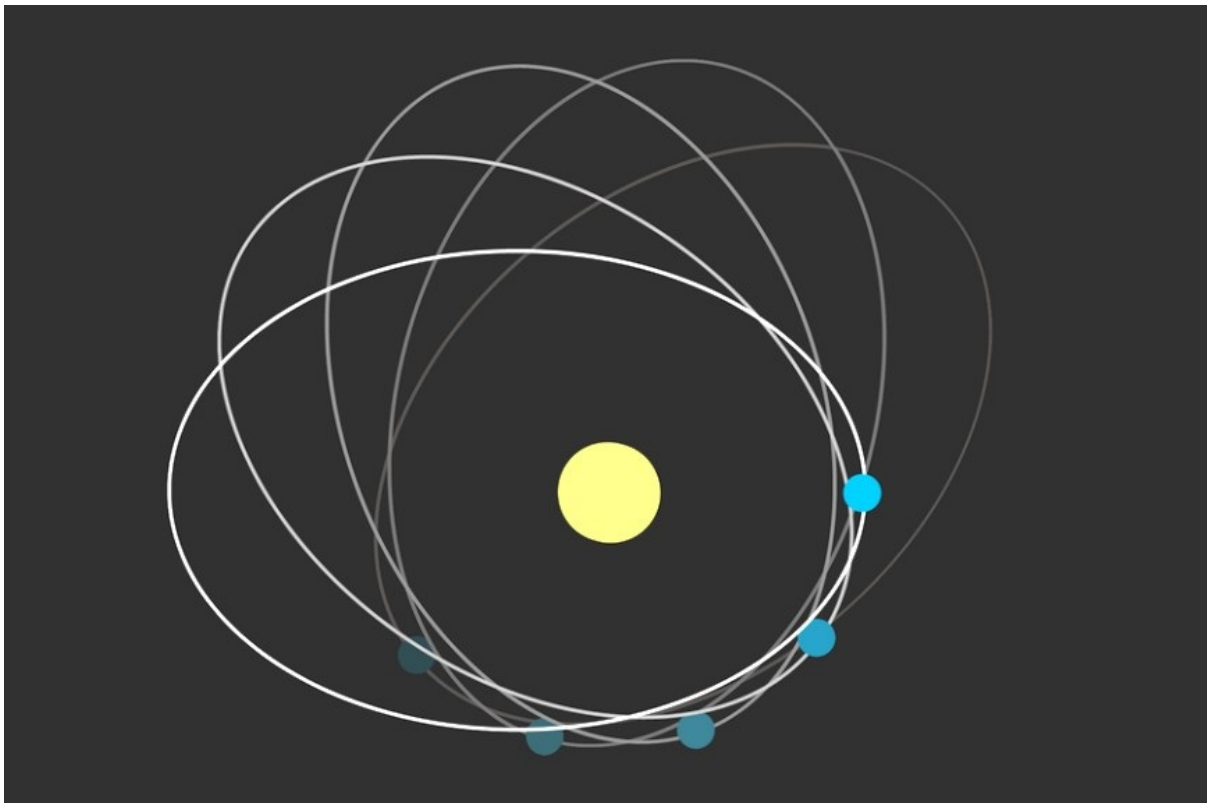


Figura 2.2: El movimiento de la elipse de los planetas, conocida como «precesión del perihelio», bastante exagerada para hacerla visible. El punto de la órbita más cercano al Sol (perihelio) rota alrededor del Sol. (Crédito: Rainer Zenz, dominio público).

A nivel conceptual, la relatividad general es radicalmente distinta de la teoría de Newton. Dice que la gravedad no es una fuerza sino una deformación del espacio-tiempo. La Luna lleva a cabo una trayectoria elíptica alrededor de la Tierra no porque actúe sobre ella una fuerza, sino porque la Tierra deforma el espacio-tiempo alrededor de la misma y, en dicho espacio-tiempo deformado, la trayectoria natural ya no es más una línea recta sino una elipse.

Cuando no hay gravedad, la trayectoria más natural es una línea recta. Cuando hay gravedad y el espacio-tiempo se curva, la trayectoria más natural es la curva que minimiza las distancias. Una analogía es considerar un colchón. Si uno hace rodar una pelota de golf en el mismo, irá en línea recta. Pero si uno se acuesta sobre el colchón, deformándolo, la pelota realizará una trayectoria curva. En la relatividad general el colchón es el espacio-tiempo mismo.

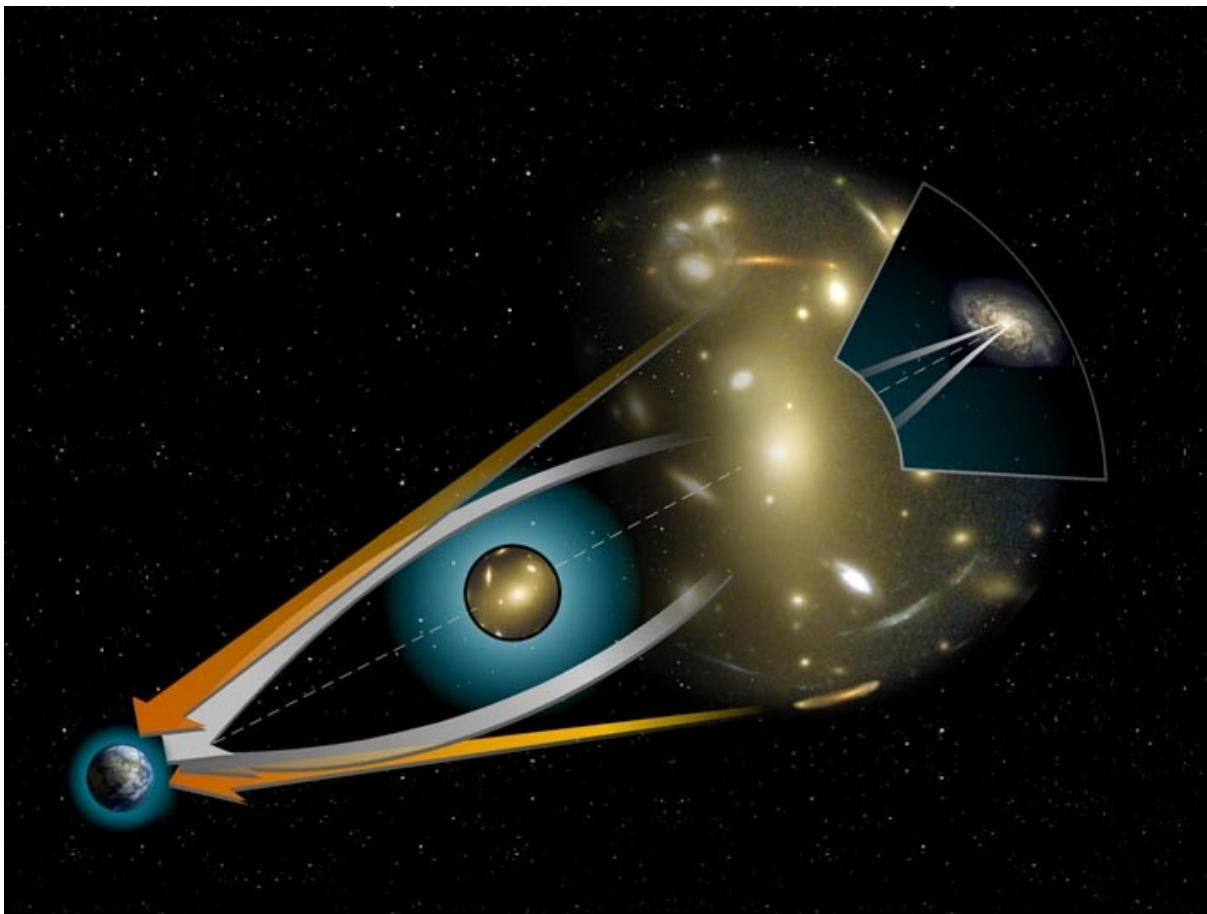


Figura 2.3: Una configuración de lente gravitacional. Dada la curvatura del espacio-tiempo que induce el Sol en su vecindad, la posición de la estrella en el cielo aparece hacia afuera con respecto a donde realmente está. Esto no se puede observar usualmente porque la luz del Sol es demasiado intensa, pero

puede serlo durante un eclipse de Sol, cuando la Luna se interpone entre el Sol y la Tierra y bloquea su luz, haciendo las estrellas ligeramente detrás del Sol visibles. (Crédito: STScI, dominio público).

La deformación del espacio-tiempo implica que la luz de las estrellas que pasa cerca del Sol se dobla. Medir este efecto es difícil, uno no puede simplemente apuntar un telescopio hacia el Sol. Hay que hacerlo cuando la luz del Sol está bloqueada por un eclipse. Si se toma una fotografía del cielo cercano al Sol cuando esta tapado por el eclipse y se la compara con una fotografía de la misma región del cielo de noche, cuando el Sol no está en ella, las estrellas cercanas al Sol aparecerán ligeramente corridas hacia el punto donde estaba el centro del Sol. El efecto es pequeño, aproximadamente de dos segundos de arco (un grado son 3600 segundos de arco), pero fue medido en 1919 por una expedición británica liderada por *sir* Arthur Eddington. La medición estaba de acuerdo con la predicción de la teoría de Einstein y no con la de Newton. Esta medición lanzó a Einstein al superestrellato, convirtiéndolo en el primer científico/celebridad de la historia.

Aparte de estas predicciones, la relatividad general de Einstein también predice la existencia de ondas gravitacionales, ondulaciones en el espacio-tiempo que se producen cuando se aceleran violentamente masas y viajan a la velocidad de la luz. Las ondas gravitacionales fueron detectadas directamente por primera vez en 2015, provenientes de una colisión de dos agujeros negros que ocurrió a 1500 millones de años luz de la Tierra. Este descubrimiento fue galardonado con el Premio Nobel de física de 2017.

Los agujeros negros son otra predicción de la teoría de Einstein. Son regiones del espacio-tiempo donde la gravedad es tan intensa que nada, ni siquiera la luz, puede escapar.

Dado lo diferente que es la relatividad general de las teorías que describen todas las otras interacciones (todas ellas son tratadas como fuerzas mientras que la relatividad general habla de una deformación del espacio-tiempo), no es de sorprender que la cuantización de la gravedad descrita por la relatividad general sea un desafío más grande que la cuantización de las otras interacciones.

Capítulo 3

LA TEORÍA CUÁNTICA

Al comienzo del siglo xx los físicos comenzaron a estudiar la materia a escala microscópica. La idea de los átomos se remonta a los griegos, pero en esa época era solo una especulación. En el siglo xx, el hecho de que la materia está constituida por átomos y estos últimos por un núcleo y electrones, fue verificada experimentalmente. También se notó que, a escala microscópica, las cosas no se comportan como los objetos en nuestra vida cotidiana macroscópica. Pasan cosas extrañas. Para empezar, si un átomo está compuesto de un núcleo positivo con un electrón negativo orbitando alrededor, este último debería emitir radiación electromagnética. Esto es debido a que un movimiento circular es un movimiento acelerado (la velocidad cambia de dirección a medida que se avanza en la órbita) y las cargas aceleradas radian.

Esto es, por ejemplo, lo que sucede en el interior de la antena de un transmisor de radio: los electrones son acelerados hacia adelante y hacia atrás por una corriente alterna proveniente del transmisor. La emisión de radiación electromagnética debería hacerle perder energía al electrón en órbita y hacer encoger al átomo. Eventualmente el electrón chocaría con el núcleo. El problema es que este proceso debería pasar muy rápido: ¡en una millonésima de millonésima de segundo! Pero los átomos son estables, esencialmente para siempre (todos estamos hechos de átomos). Para resolver esto, fue creada una nueva teoría conocida como la teoría cuántica.

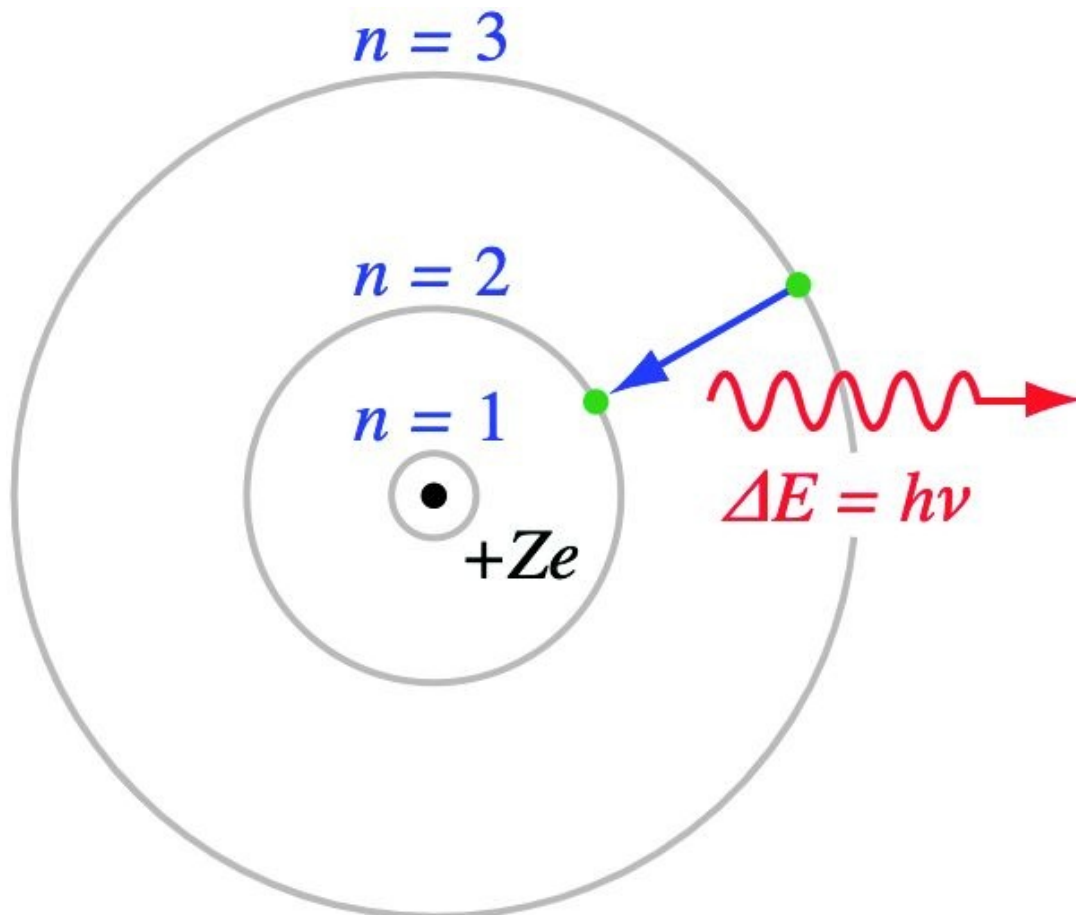


Figura 3.1: Órbitas atómicas cuantizadas. Cuando un electrón decae de una órbita como $n = 3$ a una de energía menor como $n = 2$, emite un fotón de energía $\Delta E = h\nu$. h es conocida como la constante de Planck y ν es la frecuencia de fotón, que está determinada por la diferencia de los niveles de energía del átomo. Z es el número de protones en el núcleo y e su carga eléctrica. (Crédito: JabberWok/Wikimedia Commons CC BY-SA 3.0).

Esta teoría tiene una serie de comportamientos contraintuitivos que no vemos en la vida cotidiana, porque en el mundo macroscópico, donde aproximadamente tenemos del orden de 10^{23} átomos, dichos efectos sutiles se desdibujan. El nombre «cuántica» viene del hecho de que varias cantidades en la teoría no pueden tomar valores arbitrarios sino lo que se denomina «cuantos» de valores discretos.

En el caso del átomo que discutíamos, las órbitas no pueden tener cualquier radio, sino una serie de valores predeterminados. Un electrón que circula en uno de esos radios no puede emitir una cantidad pequeña de radiación y encoger un poco su órbita. Tiene que perder y caer una cantidad predeterminada. Esto ocurre a veces, pero como existe un número finito posible de órbitas, eventualmente se estabiliza y deja de emitir radiación. Esto tiene efectos en la vida cotidiana. Por ejemplo, si uno derrama sal sobre una llama, la misma excitará a los electrones de la sal haciéndolos saltar a una órbita más grande y, eventualmente, decaerán a una menor, emitiendo luz. El

color de la luz emitida (amarillo para la sal) tiene que ver con la separación de las órbitas de los átomos de sodio que constituyen la sal. Puedes probar esto en tu casa. Otros compuestos dan otros colores.

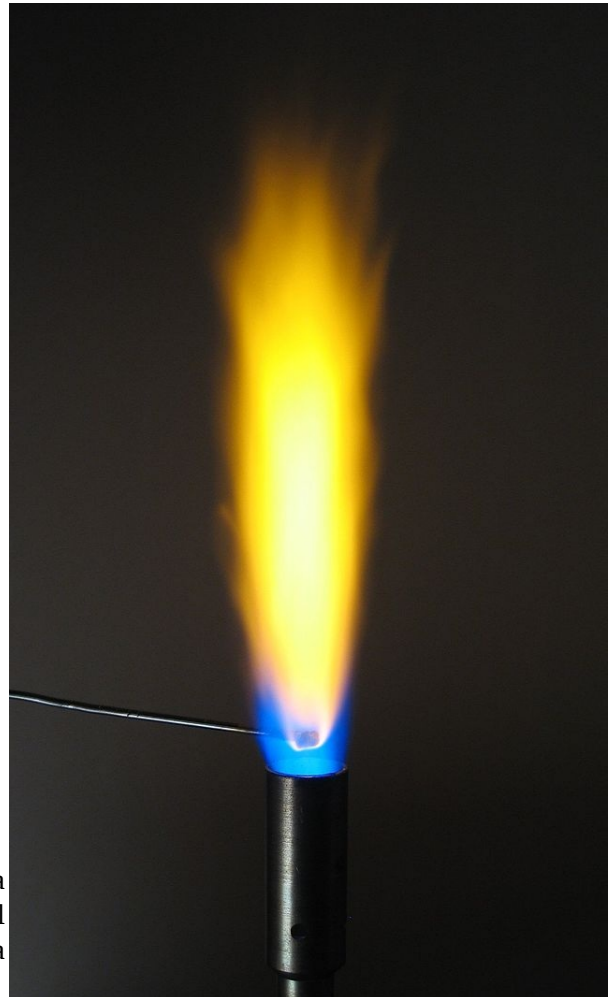


Figura 3.2: Un hisopo conteniendo sal en una llama, emitiendo el característico color amarillo del sodio. (Crédito: Sören Wedell Nielsen/Wikimedia Commons CC BY-SA 3.0).

Otra propiedad inusual de la teoría cuántica es que es probabilística: solo predice probabilidades para los valores de las cantidades, no da predicciones precisas dadas las condiciones iniciales. La mecánica de Newton, dadas las posiciones y velocidades iniciales de las partículas, predice precisamente el valor final de las mismas. En la teoría cuántica uno obtiene que hay una probabilidad de estar en un punto y otra probabilidad de estar en otro punto. Solo sabremos cuál es si vamos y medimos.

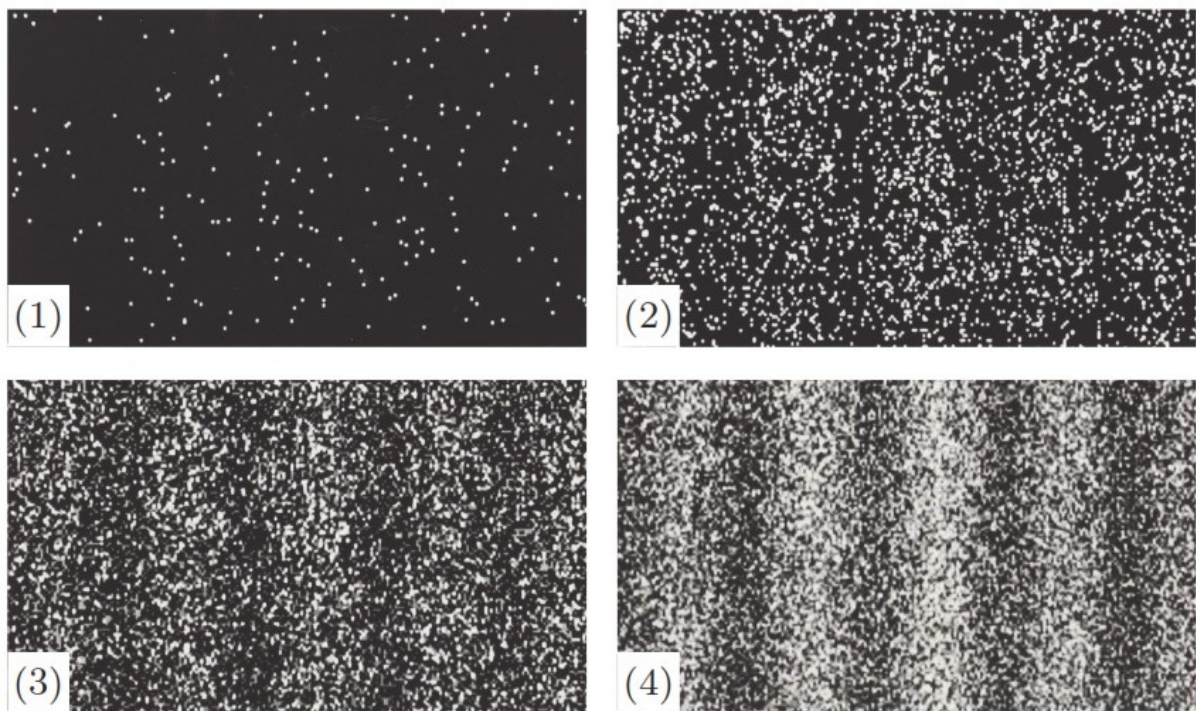


Figura 3.3: Como los electrones impactan en la pantalla y comienzan a formar un patrón de interferencia. (Crédito: Dr. Tonomura and Belsazar, Wikimedia CC BY-SA 3.0).

Existe un experimento conocido como el de la doble rendija. Supongamos que tenemos una tabla como un pizarrón y cortamos dos rendijas verticales en la misma, un poco más anchas que una pelota de tenis. Ahora tomamos uno de esos cañones de pelotas de tenis de práctica y disparamos hacia la tabla. En la mecánica clásica las pelotas bien rebotarán en la tabla o bien atravesarán las rendijas. Si las pelotas estuvieran cubiertas de tiza, uno obtendría una marca en la pared detrás de la tabla con la forma de las rendijas cuando las pelotas pasan por las mismas y golpean en la pared. Si uno ahora encoge el experimento a tamaño microscópico, las cosas serían distintas.

No es que esto se pueda hacer directamente, pero hay situaciones análogas, como por ejemplo usando cristales en lugar de la tabla y electrones en lugar de pelotas de tenis, y una placa fotográfica en lugar de la pared. No veríamos líneas verticales como en el caso macroscópico, sino un rango ondulante de intensidades en la placa fotográfica. Lo que está pasando es que los electrones se comportan como ondas. Supongamos que tenemos un tanque de agua y sumergimos la tabla con las rendijas y hacemos que una onda en el agua impacte en las rendijas. Partes de la onda pasará por las rendijas e interactuarán entre sí formando un patrón ondulatorio en el agua. Esto es similar a lo que hacen los electrones. Pero los electrones se comportan como partículas también. Si uno hace el experimento con solo un electrón por vez,

en la placa fotográfica impactarán como un punto. Pero a medida que más y más electrones pasan, el patrón ondulado se formará.

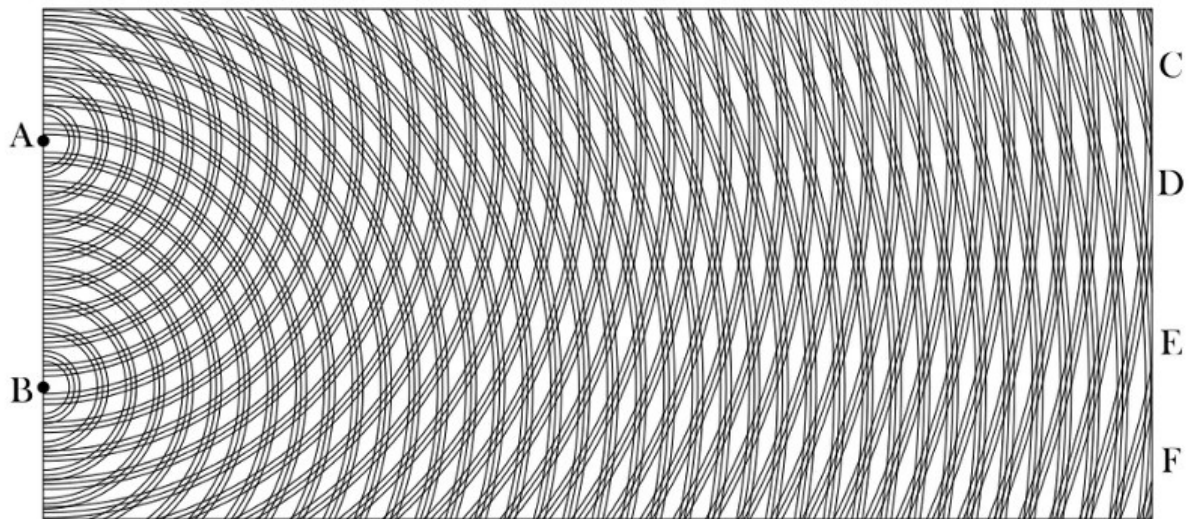


Figura 3.4: Patrón de interferencia de ondas de agua pasando por dos rendijas, A y B. Bosquejo del siglo XVIII del físico británico Thomas Young, que descubrió el fenómeno de interferencia en el contexto de la luz. (Wikimedia/Dominio público).

La teoría va más allá y nos dice que no podemos saber por cuál de las rendijas pasó el electrón. Más en general, la teoría cuántica dice que las propiedades de un sistema no toman valores hasta que se las mide. No es que no sepamos sus valores hasta que se miden, como pasa en mecánica clásica. Simplemente no tienen que tomar valores para que la matemática de la teoría sea consistente.

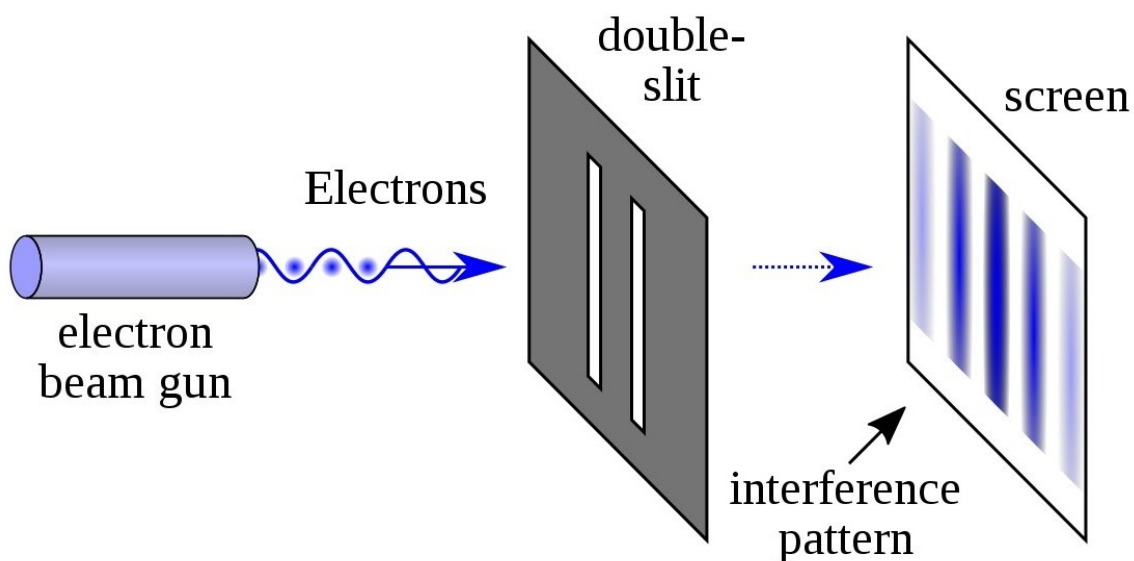


Figura 3.5: Experimento de la doble rendija con electrones. (Crédito: NekoNekoJa/Wikimedia CC BY-SA 4.0).

Estas propiedades contraintuitivas de la teoría cuántica se complican aún más cuando queremos aplicarla a la relatividad general. Dado que ahí la gravedad está descrita por deformaciones del espacio-tiempo, eso quiere decir que estaríamos cuantizando el espacio-tiempo en que vivimos. Será probabilístico, a veces se comportará como ondas, a veces como partículas y no tendrá valor alguno hasta que lo midamos. No es sorprendente que entender esto nos esté dando trabajo. Que la gravedad debe ser cuantizada es algo que sabemos desde 1916. En su trabajo sobre ondas gravitacionales Einstein dijo en ese año que, como las ondas electromagnéticas, las ondas gravitacionales deberían ser cuantizadas. Así como las ondas electromagnéticas están cuantizadas en fotones, debería haber algo similar para la gravedad: el gravitón. En ese entonces Einstein no hizo ningún cálculo concreto. De hecho, la teoría cuántica no se completaría hasta el final de los años 20 del siglo xx.

En los 40 y 50 de dicho siglo las interacciones fuertes y débiles comenzaron a ser entendidas. En los 60 la gente comenzó a aplicar las mismas técnicas que habían utilizado para cuantizar las interacciones fuertes y débiles a la gravedad, pero tuvieron dificultades. Aparecían infinitos que no se podían eliminar y, en la naturaleza, nada puede ser infinito. Así que había problemas e inconsistencias a la hora de cuantizar la gravedad, lo que provocó una división entre los físicos.

Un grupo sostenía que las dificultades encontradas sugerían que la teoría de Einstein no era la teoría correcta a cuantizar. Subyacente a la misma debería existir una teoría más fundamental que coincide con la teoría de Einstein en el mundo macro, pero que es distinta, y esa teoría más fundamental es la que se debe cuantizar. La gente que trabaja en teoría de cuerdas piensa de esa manera. La teoría de cuerdas es la que debe ser cuantizada y la relatividad general emerge solo en el mundo macro.

Existen ejemplos de situaciones como esta. En los años 50 del siglo xx, antes de que se las entendiera como teorías de Yang-Mills, Fermi ya tenía una teoría de las interacciones débiles aunque la misma tenía problemas cuando se la trataba de cuantizar. Más tarde se entendió que emerge en un cierto régimen de las teorías de Yang-Mills, y esta última es la que debe cuantizarse y no tiene los problemas de la teoría de Fermi.

El otro grupo de gente —y esto incluye a los que trabajamos en Gravedad cuántica de lazos—, pensamos que la teoría de Einstein muy posiblemente es correcta, el problema es que es tan distinta a las otras teorías que las técnicas

que se desarrollaron para cuantizarlas no funcionan y hacen falta técnicas nuevas. En particular, la relatividad general tiene una simetría que las otras teorías no tienen. Porque es una teoría de la geometría misma hasta que uno la resuelve, esto es, hasta que uno no tiene una geometría dada, los puntos del espacio-tiempo son todos equivalentes entre sí, y se les puede mover libremente. Para dar una analogía, consideremos que estamos en un barco, lejos de la costa, en una noche nublada. Uno no puede decir dónde está el barco. Todos los puntos del océano son equivalentes. Uno puede mover el barco en cualquier dirección y todo parecerá lo mismo. En este contexto «una geometría dada» sería el poder ver la costa. Ahí los puntos del océano ya no son equivalentes, algunos estarán más cerca de la costa y notaríamos si el barco se moviera. Esto es lo que técnicamente se conoce como «invariancia bajo difeomorfismos». «Modismo» quiere decir mover y «difeo» se refiere a que son diferenciables (en particular continuos) para evitar separar puntos que están juntos. Esta simetría no está presente en las teorías de Yang-Mills que describen todas las otras interacciones. Allí los puntos están fijos y bien definidos desde el principio. Alguna gente cree que una técnica de cuantización que incorpore la invariancia bajo difeomorfismos va a ser crucial para desarrollar una teoría de la gravedad cuántica. La Gravitación Cuántica de Lazos incorpora esta simetría.



Figura 3.6: Un barco en la mitad del océano en una noche nublada no podría distinguir un punto del océano de otro. Lo mismo pasa con las teorías geométricas de la gravedad: hasta que uno introduce una geometría todos los puntos del espacio-tiempo son equivalentes y pueden moverse de un lugar a otro. Esto es técnicamente conocido como invariancia bajo difeomorfismos. La imagen es *La ráfaga*, cuadro de Willem Van de Velde (el Joven), hacia 1680.

Como mencionamos, la gravedad es una teoría del mundo macroscópico, donde los efectos cuánticos no son relevantes. En el mundo microscópico la gravedad es despreciable. Por ejemplo, dos electrones se atraen gravitacionalmente porque tienen masa y se repelen porque tienen carga eléctrica. La repulsión eléctrica es 10^{44} veces más fuerte que la atracción gravitacional. Esta es la razón por la que es difícil encontrar situaciones experimentales en donde los efectos de la gravedad cuántica sean importantes.

Esto suscita la pregunta: ¿para qué cuantizarla entonces? La respuesta más inmediata es que la física tiene que tener coherencia, y si la teoría cuántica subyace al resto de la física también debería subyacer a la gravedad, aunque los efectos sean pequeños. Además, como mencionamos, una de las propiedades sorprendentes de la física cuántica, la de que las magnitudes no tienen valores hasta que uno las mide, hace difícil, si no imposible, acoplar consistentemente teorías clásicas y cuánticas. También, como veremos, hay situaciones como el Big Bang y los agujeros negros que requieren cuantizar la gravedad.

Así que hemos preparado el escenario para la Gravedad cuántica de lazos: alguna gente cree que el problema de cuantizar la gravedad requiere de una teoría nueva como la teoría de cuerdas, otros que uno necesita mejores técnicas de cuantización, en particular compatibles con los difeomorfismos. Entre este grupo estamos los que trabajamos en Gravedad cuántica de lazos, teoría que describimos en el capítulo siguiente.

Capítulo 4

GRAVEDAD CUÁNTICA DE LAZOS

Hemos explicado los dos primeros términos del título de esta sección, pero ¿qué es esto de los lazos? Para discutirlo vale la pena retornar al electromagnetismo y uno de sus pioneros, Michael Faraday. Él tenía la notable característica de haber nacido pobre. En la Inglaterra del siglo XIX eso significaba no ir a la escuela y, por supuesto, ni hablar de ir a la universidad. Así que Faraday se educó a sí mismo. Consiguió trabajo en una librería e hizo un trato con el dueño para que le permitiera quedarse a limpiar el lugar después de que cerrara y así podía leer todo lo que quisiera. Pero este auto-entrenamiento lo ponía en desventaja: no era dúctil con la matemática. Así que para entender los campos eléctricos inventó una herramienta visual.

Supongamos que tenemos un campo eléctrico. Si ponemos una carga en el mismo, sentirá una fuerza y comenzará a moverse. Las líneas de campo son líneas imaginarias que siguen las trayectorias de las cargas que uno pone en el campo. La belleza de esta técnica es que en situación de alta simetría uno puede dibujar las líneas de campo sin hacer ningún cálculo solo invocando la simetría. Por ejemplo, si uno tiene una carga esférica, es bastante obvio que las líneas de campo deben ser radiales. Cualquier otra configuración violaría la simetría esférica.

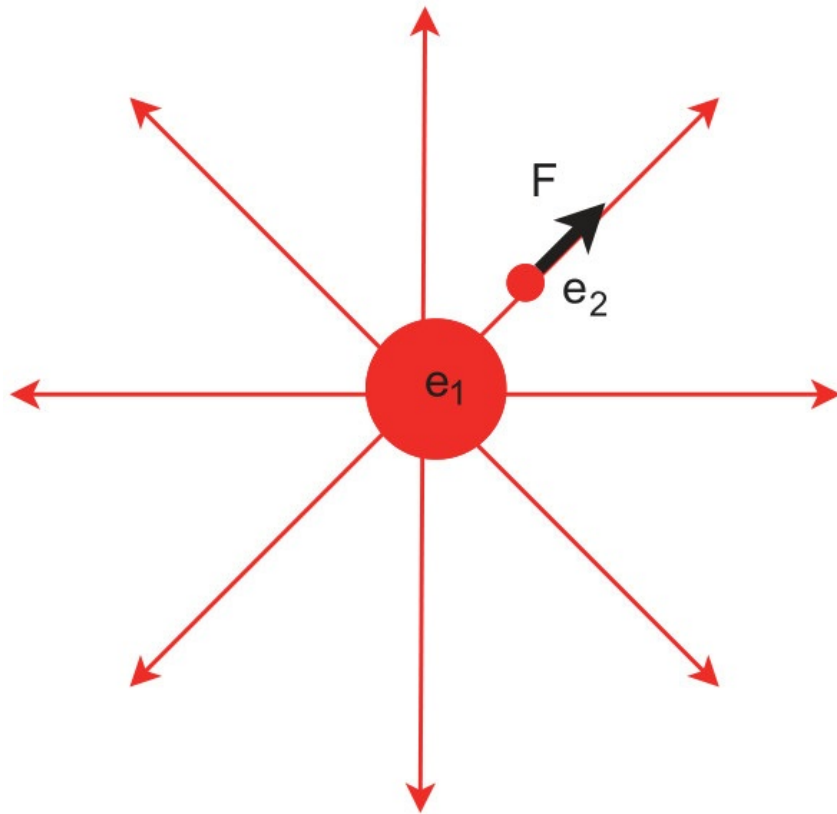


Figura 4.1: El campo de una carga puntual e_1 . Una pequeña carga e_2 sentiría una fuerza a lo largo de la línea de campo.

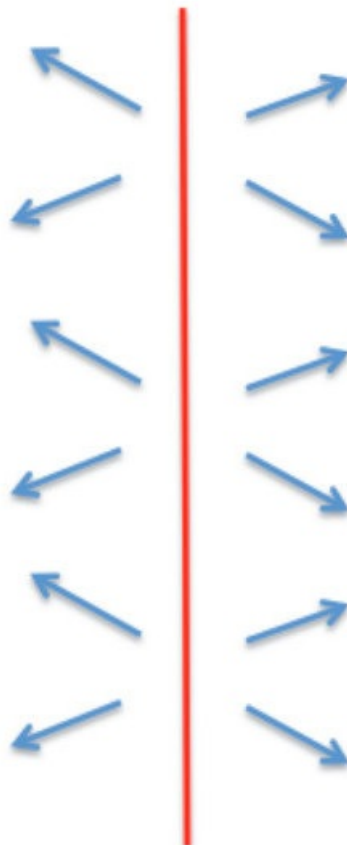


Figura 4.2: El campo de un alambre infinito cargado.

Similarmente, si uno tuviera un alambre vertical muy largo cargado, las líneas emanarían radialmente en el plano perpendicular al alambre y estarían equiespaciadas verticalmente (cualquier otra configuración estaría en contradicción con que los puntos de un alambre muy largo recto son todos equivalentes). Otra propiedad que notó Faraday es que los campos son más intensos donde las líneas de campo están más juntas.

Volvamos al ejemplo de la simetría esférica. Si nos alejamos de la carga, la densidad de las líneas de campo disminuye. Un poco de reflexión lleva a la conclusión de que lo hace como la inversa del cuadrado de la distancia a la carga, dado que las líneas se abren linealmente en dos direcciones. Pero esa es precisamente la tasa a la que decrece el campo eléctrico de una carga puntual, como la inversa de la distancia al cuadrado. Similarmente, para el alambre cargado infinito la densidad de las líneas disminuye como la inversa de la distancia (las líneas solo se abren en el plano perpendicular al alambre, no en dos direcciones como en el caso esférico). Y así es precisamente como decae el campo de un alambre. ¡Así que estamos calculando campos eléctricos dibujando!

En los años 80 del siglo xx se sabía que tres de las cuatro interacciones fundamentales —la electromagnética, la fuerte y la débil—, estaban descritas por teorías de Yang-Mills. Estas son generalizaciones de la teoría de Maxwell con varios campos eléctricos y magnéticos que interactúan entre sí. En esa época Gambini y Trías encontraron una manera de describir estas teorías en términos de las líneas de Faraday. ¿Qué tiene que ver esto con la gravedad? En 1986 Abhay Ashtekar, por aquel entonces en la universidad de Syracuse en el estado de Nueva York, encontró una manera de escribir la relatividad general de Einstein como si fuera una teoría de Yang-Mills modificada.

Resulta que uno puede reescribir la geometría del espacio-tiempo en términos de los campos eléctricos y magnéticos de dichas teorías. Las líneas de Faraday de esos tipos de teorías son un poco más complicadas que las del electromagnetismo. Las líneas pueden intersectarse entre sí y cada segmento entre intersecciones tiene un «número», también llamado «color». Esto es debido a las interacciones y a la presencia de varios campos eléctricos y magnéticos. Los diagramas de estas líneas, que son «gráficos coloreados con intersecciones» son los «lazos» de la gravedad cuántica de lazos (inicialmente la importancia de las intersecciones no fue apreciada y la gente realmente pensaba en lazos). En estos días son más conocidas como «redes de espín». En la década del 60 del siglo xx, el conocido físico británico Roger Penrose (uno de los ganadores del Premio Nobel 2020) escribió un premonitorio

trabajo que sugería que las redes de espín podrían tener que ver con la gravedad cuántica.

Veinticinco años más tarde esa predicción se confirmó con precisión. En 1988 Carlo Rovelli y Lee Smolin decidieron tomar los lazos en serio y construir una teoría cuántica de la gravedad enteramente en términos de lazos.

En la teoría cuántica un elemento importante es el estado cuántico del sistema, que queda representado por una función llamada «función de onda». En la gravedad cuántica de lazos las funciones de onda son funciones de las redes de espín. Pero, recordando que la relatividad general tiene esta simetría donde uno puede mover continuamente los puntos del espacio-tiempo, esto quiere decir que las funciones de onda deben ser tales que no cambien cuando uno deforma continuamente los grafos. La rama de la matemática que estudia funciones de este tipo se llama teoría de nudos. Una novedosa conexión de la gravedad cuántica con la teoría de nudos había nacido. El término «nudo» en este contexto literalmente se refiere a nudos porque si en un grafo hay un nudo, el mismo no puede ser eliminado con una deformación continua del grafo, siempre estará ahí.

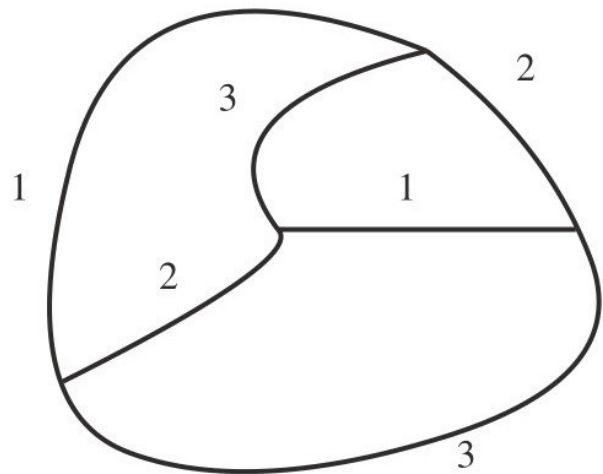


Figura 4.3: Un ejemplo de una red de espín.

Cada vez que una nueva rama de la matemática se aplica a un problema físico uno puede esperar que pasen cosas interesantes. Al principio hubo mucha expectativa, hasta se llegó a pensar que el problema de la gravedad cuántica se había resuelto. Pero las complejidades de la gravedad cuántica emergieron y, aunque no hemos resuelto el problema, se han hecho interesantes progresos.

Para empezar, cuando uno tiene una teoría cuántica, necesita una noción de qué tan cerca o lejos están los estados cuánticos unos de otros. Técnicamente esto se conoce como una «medida» o «producto interno». Esto es lo que permite hacer predicciones físicas. A comienzo de los años 90 del

siglo xx, Abhay Ashtekar y Jerzy Lewandowski se dieron cuenta de que podían crear una distancia entre estados consistente con la simetría bajo difeomorfismos y que puede explicarse sencillamente en forma gráfica. La idea está ilustrada en la figura 4.4. Dos estados basados en grafos que pueden ser deformados uno al otro son esencialmente idénticos: su distancia es cero. Dos estados cuyos grafos no pueden ser deformados el uno al otro tienen distancia infinita entre ellos. Como el diagrama indica, los estados que tienen distancia infinita pueden estar basados en grafos que se parecen muchísimo en su forma, pero el pequeño nudo garantiza que no pueden ser deformados el uno al otro. La descripción es simple, pero los detalles técnicos (espacios no-lineales de conexiones módulo transformaciones de gauge) que subyacen a esta «distancia» son bastante complejos.

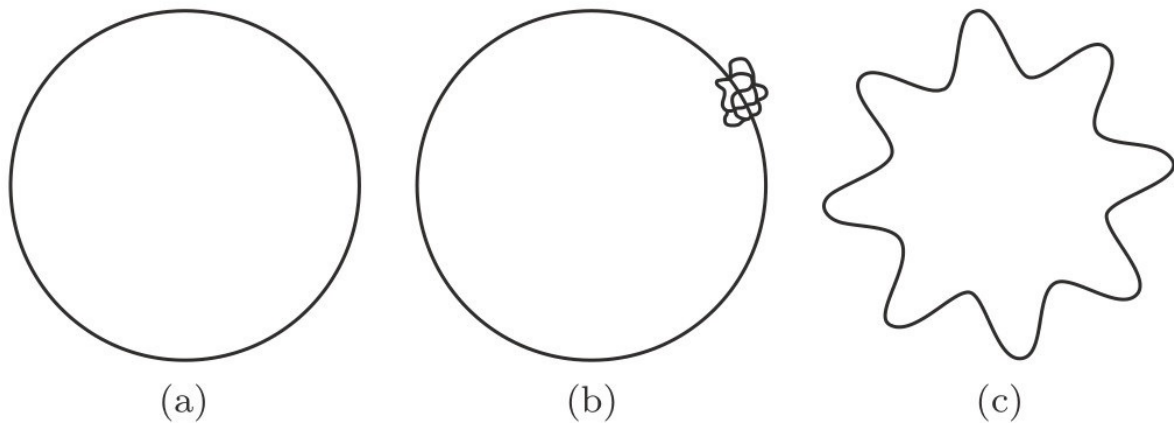


Figura 4.4: Estados cuánticos basados en las redes de espín (a) y (c) están muy cerca usando la «distancia» entre estados de Ashtekar y Lewandowski. De hecho, son el mismo estado, dado que las redes de espín se pueden deformar una en la otra aunque parezcan muy distintas. Ambos están a infinita distancia de (b) porque el pequeño nudo no puede ser deformado. Esto es así aun cuando en el caso de (a) las redes de espín se parecen mucho, aparte del pequeño nudo.

Aún más interesante es que unos años más tarde Jerzy Lewandowski, Andrzej Okołów, Hanno Sahlmann y Thomas Thiemann, e independientemente, Christian Fleischhack demostraron un teorema (conocido por sus iniciales como LOST-F) que indica que con ciertas hipótesis razonables, la distancia de Ashtekar y Lewandowski es esencialmente única. Así, es interesante que esta matemática nos guía hacia la teoría, nos está escogiendo la distancia. Una hipótesis central es la invariancia bajo difeomorfismos y esto es interesante porque en otros enfoques a la gravedad cuántica esta simetría no se incorpora desde el principio como se hace aquí.

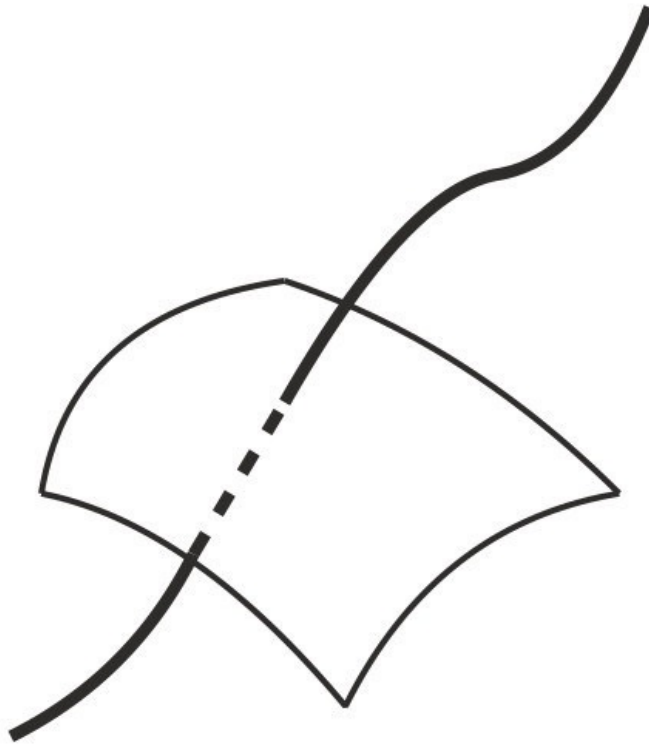


Figura 4.5: Una superficie adquiere un cuanto de área cuando la atraviesa la línea de una red de espín.

En el espacio de estados cuánticos con la distancia que discutimos, Carlo Rovelli y Lee Smolin y, por separado, Ashtekar y Lewandowski comenzaron a construir cantidades físicas a nivel cuántico (conocidas como «operadores cuánticos») que corresponden a magnitudes clásicas que uno puede observar. Por ejemplo, la superficie de un área o el volumen de una región del espacio. En el caso del área de una superficie, está relacionada con cuántas líneas de un grafo atraviesan la superficie. Eso indica que el área de la superficie no puede tomar un valor arbitrario, porque el número de líneas es un número discreto. El área está «cuantizada». Para superficies de nuestra vida cotidiana, como el área de una mesa, el número de líneas que la cruza es enorme (alrededor de 10^{66} por centímetro cuadrado). Así que parece que el área puede tomar cualquier valor. Pero si uno considerara una mesa microscópica, su área solo podría tomar ciertos valores. De hecho, uno podría encontrarse en una situación en la que si ninguna línea del estado cuántico la atraviesa, su área es cero. ¿Cómo puede una superficie tener área cero? Esa sería una situación «muy cuántica», bastante distinta de lo que experimentamos en nuestra vida cotidiana.

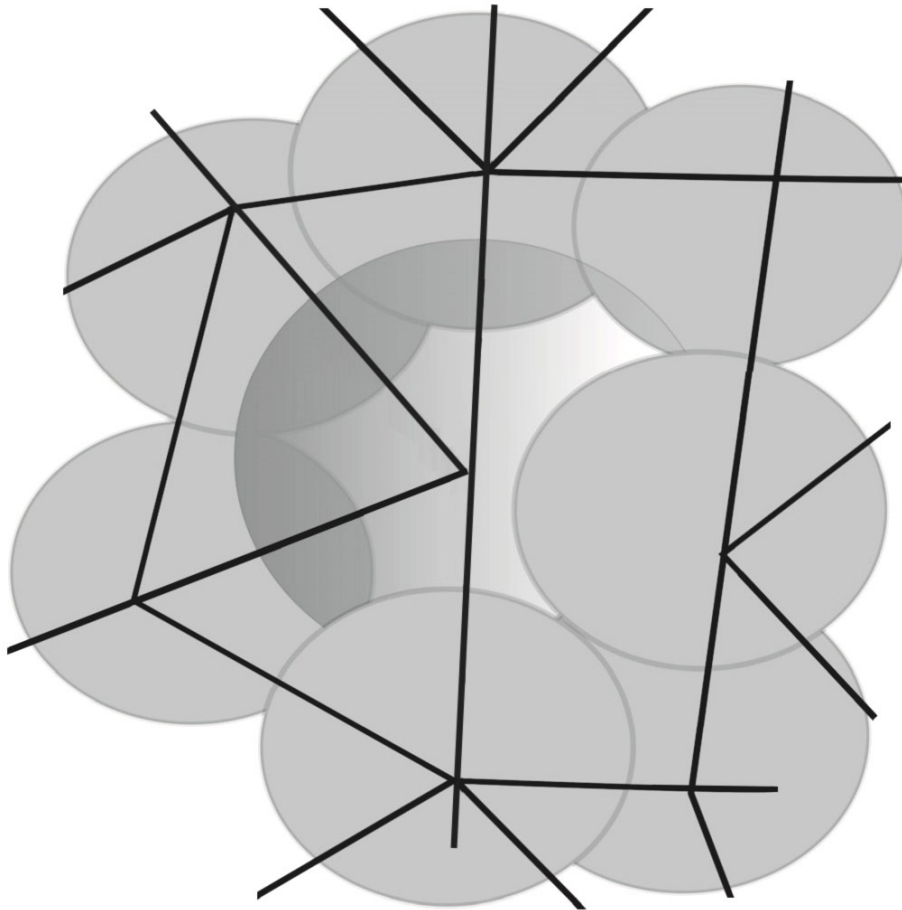


Figura 4.6: Los ladrillos elementales que construyen un espacio-tiempo basados en las redes de espín. Los vértices generan cuantos de volumen.

Similares consideraciones se aplican al volumen de una región. Es proporcional a cuántas intersecciones tiene el grafo del estado cuántico en la región en cuestión. Se ha especulado por mucho tiempo que las áreas y volúmenes deberían estar cuantizados en la gravedad cuántica. Pero aquí el resultado no es especulado, emerge en forma precisa del marco conceptual y con una fórmula específica que difiere de la que la gente había especulado en el pasado. En particular, implica que los extraños efectos que aparecen en el mundo microscópico desaparecen muy rápido cuando uno considera áreas más grandes y nuestro mundo macroscópico usual emerge muy rápido. La imagen del espacio-tiempo cuántico que emerge de las redes de espín está constituida de ladrillos de un volumen dado, determinado por el número y las propiedades de las intersecciones. La gravedad cuántica de lazos asignará probabilidades a las diferentes redes de espín.

Finalmente, en 1996, Thomas Thiemann usó los operadores cuánticos que discutimos para, de una manera precisa, escribir una versión cuántica de las ecuaciones de Einstein de la relatividad general. Mostró que las ecuaciones están bien definidas matemáticamente, son consistentes entre sí, y no

aparecen infinitos. Había construido una teoría bien definida, no-trivial y consistente de la gravedad cuántica.

Así que vale la pregunta: ¿hemos terminado? El único paso que falta es verificar que la teoría predice la física correcta. El problema es que la teoría resultó bastante difícil de analizar. Esto no es extraño, ya a nivel clásico la relatividad general es bastante difícil de estudiar. Se ha hecho poco progreso en general con la teoría cuántica construida, así que es difícil decir si es correcta. Por ello lo que la gente ha tratado de hacer es estudiarla en situaciones con mucha simetría, donde los cálculos pueden ser controlados mejor. En los próximos dos capítulos estudiaremos las aplicaciones de la teoría de Thiemann a situaciones con mucha simetría. Una será la aplicación a los agujeros negros y a su termodinámica. La otra será su aplicación a la cosmología, al estudio del universo como un todo.

Capítulo 5

APLICACIÓN: AGUJEROS NEGROS

Introduciremos los agujeros negros y discutiremos su termodinámica. Esto va a requerir que definamos ambos términos.

La termodinámica es la rama de la física que estudia sistemas con información incompleta. Un ejemplo prototípico es un gas. Típicamente, está constituido por aproximadamente 10^{23} moléculas. Obviamente uno no puede seguir en detalle sus posiciones y velocidades. Así que recurrimos a variables «macro» que caracterizan su estado, como la presión y la temperatura. Aparte de estas variables macro bien conocidas existe otra menos conocida en nuestra vida cotidiana, llamada la entropía. Es una medida de nuestro nivel de ignorancia sobre el sistema. Tiene la propiedad de que cuando los sistemas interactúan, la entropía total siempre aumenta. Puede bajar en algún subsistema, pero en total siempre aumenta. Un ejemplo de un subsistema que baja su entropía es el interior de un refrigerador, la temperatura más baja representa menos desorden y menos ignorancia del movimiento. Pero en la parte de atrás del refrigerador hay un radiador que se calienta y entonces la entropía de la cocina, incluyendo el refrigerador, aumenta. La ley que dice que la entropía siempre aumenta es conocida como la Segunda ley de la termodinámica.

La primera ley de la termodinámica es simplemente la conservación de la energía, y tiene una fórmula que relaciona los cambios de la energía con cambios en la entropía, temperatura, cambios de volumen y la presión. No la necesitaremos en detalle, pero es bueno saber que existe.

Así que esa es la termodinámica. Hablemos ahora de agujeros negros. Los agujeros negros son regiones del espacio-tiempo donde la gravedad es tan intensa que nada, ni siquiera la luz, puede salir. Si uno lanza un objeto hacia arriba en la tierra, sube, alcanza una altura máxima y baja. Si lo lanzamos a más de 40 000 kilómetros por hora, no vuelve a bajar. Es lo que usan las naves espaciales para salir de la Tierra. Si la Tierra fuera más densa, haría falta una mayor velocidad para escapar su gravedad. ¿Qué pasaría si fuera tan densa que la «velocidad de escape» es igual o mayor que la de la luz? Entonces, dado que la teoría de la Relatividad de Einstein dice que nada puede ir más rápido que la luz, nada puede escapar. El concepto de agujero negro es bastante antiguo, el obispo Mitchell en Inglaterra y Pierre-Simon Laplace en Francia los estaban discutiendo en los siglos XVII y XVIII. Lo que ellos no tenían es la idea de que la velocidad de la luz es máxima, así que no sabían que nada podía escapar de esta región. Los agujeros negros están rodeados de una superficie conocida como el «horizonte de eventos». Cualquier objeto que vaya más allá de dicha superficie queda atrapado dentro del agujero negro y no podría salir.



Figura 5.1: La primera imagen de un agujero negro obtenida por el Event Horizon Telescope (Telescopio del Horizonte de Eventos) en la galaxia M87. (Crédito: Event Horizon Telescope Collaboration).

Los agujeros negros son predicciones de la teoría de la relatividad general de Einstein. De hecho, la solución que los describe (al menos si no rotan) es tan

sencilla que fue encontrada en 1916. Pero no fue apropiadamente comprendida hasta la década del 60 del siglo xx.

El concepto de agujero negro eludió a las mejores mentes de la física del siglo xx. Hoy están bien entendidos y aceptados como parte de la astronomía normal. ¿Cómo podemos observar los agujeros negros si son negros? Debido a los efectos que generan en sus inmediaciones. Muchos agujeros negros tienen estrellas cercanas a las que les extraen materia. La misma rápidamente se estabiliza mediante colisiones en un disco como el del planeta Saturno alrededor del agujero negro, llamado disco de acreción.

La intensidad de la gravedad es tan grande que la materia del disco se calienta y emite luz y la misma puede llegar a nosotros. Esto fue capturado en 2019 de forma bastante dramática por el Event Horizon Telescope (telescopio de horizonte de eventos).

En la actualidad, con los detectores de ondas gravitacionales LIGO podemos detectar ondas gravitacionales directamente que provienen de colisiones de agujeros negros. Esto ha abierto una «era de oro» en la verificación experimental de la relatividad general con una precisión sin precedentes. Así que los agujeros negros son ahora parte de la astronomía ordinaria, pero tienen esta propiedad de que si algo cae en ellos, no puede salir.

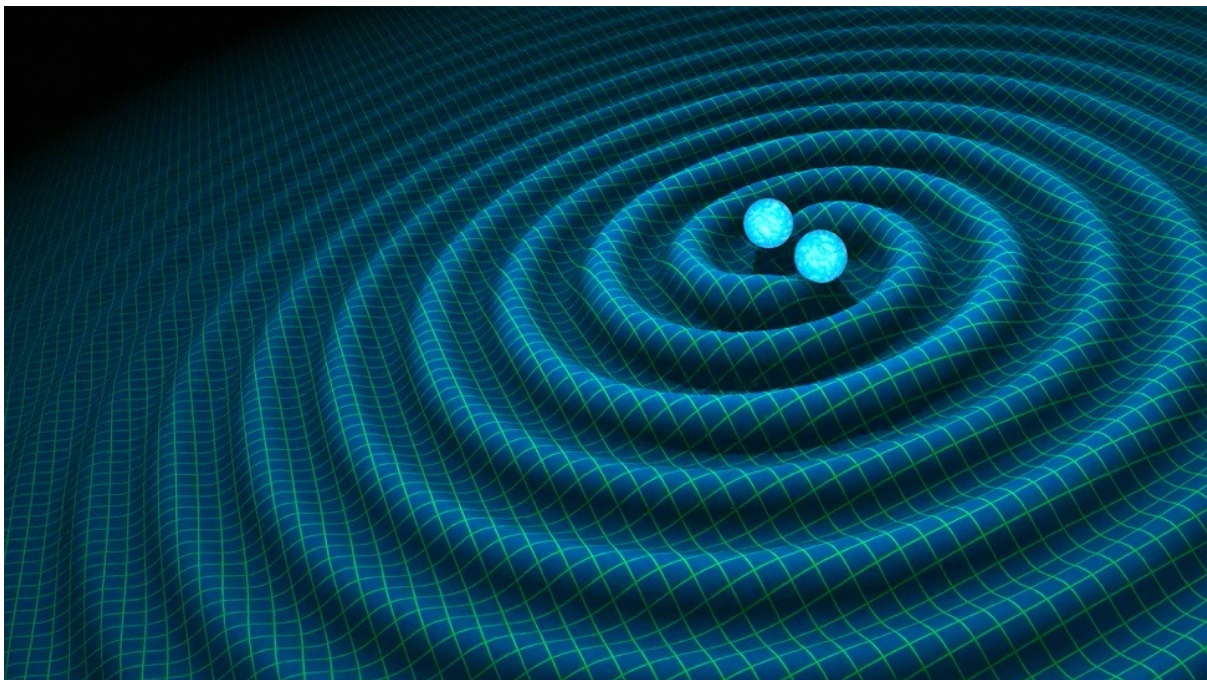


Figura 5.2: Concepción de un artista de las ondas gravitacionales producidas por la colisión de dos agujeros negros. (Crédito: R. Hurt/Caltech-JPL. Dominio público).

¿Qué tiene que ver la termodinámica con los agujeros negros? Al principio parecería que no mucho. Dado que un agujero negro es negro, no parece tener asociada ninguna temperatura. Contrariamente a un gas, es un objeto muy simple. Los agujeros negros pueden ser caracterizados por su masa y su momento angular (cómo de rápido rotan) y su carga eléctrica si la tienen. No tienen ninguna otra característica distintiva. Esto es muy distinto de, digamos, una estrella, de las cuales hay distintos tipos. Aun así creemos que los agujeros negros se forman cuando las estrellas colapsan bajo la acción de su propia gravedad. Las estrellas son esencialmente bolas de fluido que tienden a contraerse debido a su propia gravedad. A medida que lo hacen se van calentando y consecuentemente reacciones nucleares tienen lugar en su interior. Estas reacciones generan presión que detiene el colapso y estabiliza la estrella. También produce la luz que las estrellas emiten. La luz se lleva energía y la estrella comienza a consumir su combustible nuclear. Cuando el mismo se acaba, ya no hay nada que detenga el colapso y la estrella se contrae. Dependiendo de la masa de la estrella el colapso puede detenerse cuando electrones y protones se fusionan formando neutrones que se repelen entre sí a través de un mecanismo cuántico conocido como principio de exclusión de Pauli y se forma lo que se conoce como estrella de neutrones. Las mismas son estrellas de una o dos masas solares y del tamaño de una ciudad. Pero si la masa inicial es mayor, el colapso continúa y se forma un agujero negro.

Esto llevó a Jacob Bekenstein a teorizar que hay una pérdida de información asociada a un agujero negro. Es la información acerca de la estrella que lo formó. Sin importar qué tipo de estrella formó el agujero negro, el objeto final tiene solo masa y momento angular, con lo que hemos perdido información de la estrella progenitora. Nuestro nivel de ignorancia es mayor cuanto más grande es el agujero negro. Esto llevó a Bekenstein a teorizar que el área del horizonte de eventos de un agujero negro jugaba un rol de entropía, dado que caracteriza nuestro nivel de ignorancia acerca del sistema. Si a eso se añade el hecho de que siempre que los agujeros negros interactúan el área aumenta (el agujero negro se traga material y crece, no puede dejar salir nada), tenemos una Segunda Ley para la entropía del agujero negro. Él también escribió algo que se parecía a una Primera Ley, relacionando los cambios de energía (en relatividad, energía y masa son equivalentes dado $E = mc^2$), con los cambios de área y algunas otras variables.

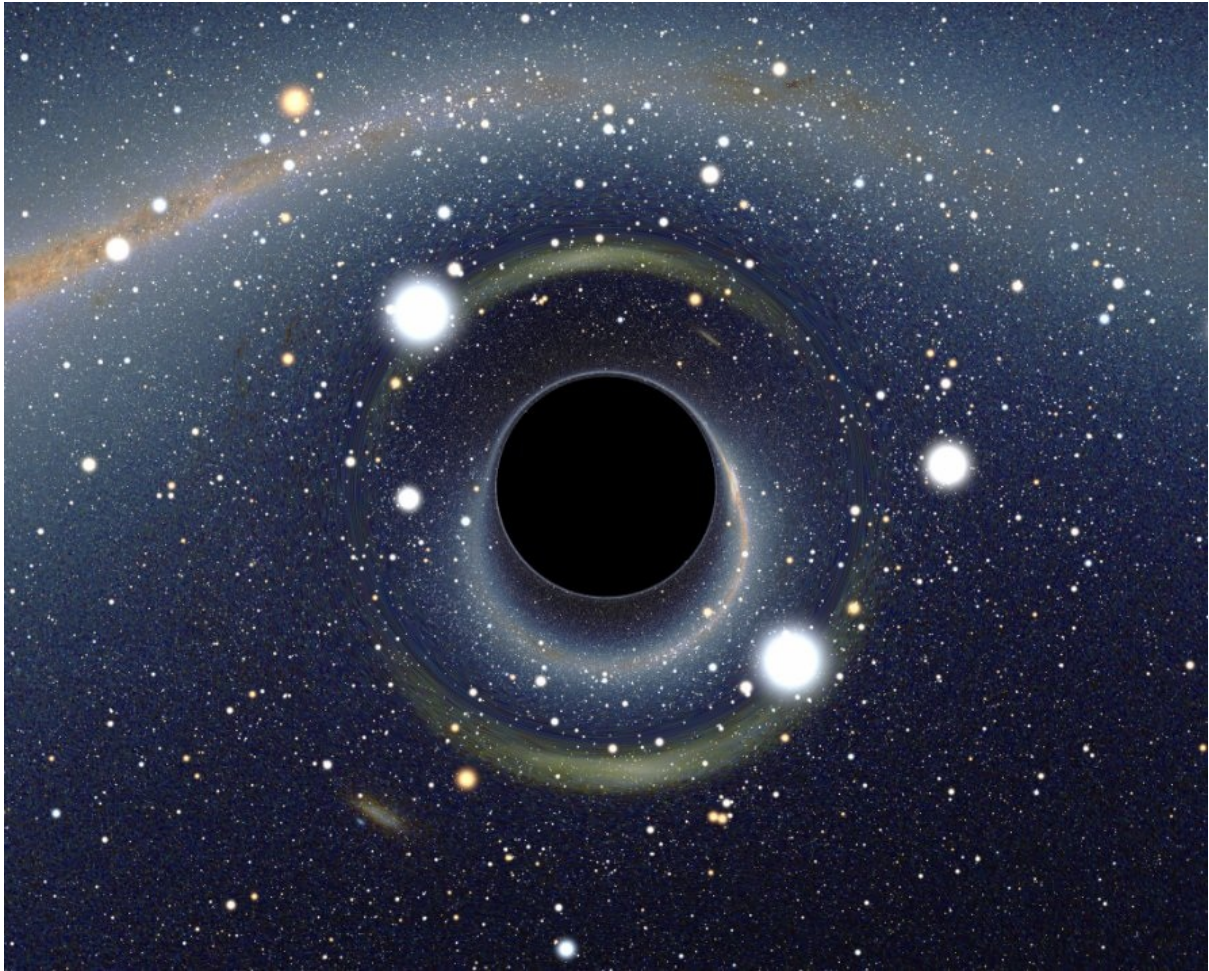


Figura 5.3: Ilustración de como se vería un agujero negro situado en frente de la Gran Nube de Magallanes. Los trazos arriba y abajo del agujero negro son imágenes muy distorsionadas de la Nube. (Crédito: Alain r/Wikimedia CC BY-SA 2.5).

Pero la gente era escéptica respecto de esta analogía dado que no había concepto de temperatura para un agujero negro. Esto cambió en 1974. Stephen Hawking estudió el comportamiento de un campo cuántico de partículas viviendo en la geometría de un agujero negro. Él no cuantizó la gravedad ni el agujero negro, en sus cálculos el agujero negro está ahí como marco de fondo, el campo cuántico de partículas no afecta al agujero negro. Esto es una aproximación, en la realidad debería hacerlo. Hawking dedujo que el campo emitía radiación térmica —del modo en que un pedazo de metal caliente al rojo vivo emite luz— con una cierta temperatura. Y dicha temperatura estaba dada por la magnitud de la gravedad en la superficie del horizonte, precisamente la cantidad que le aparecía a Bekenstein en su primera ley. ¡Así que las piezas del rompecabezas encajaban perfectamente!

Resumiendo, un agujero negro clásico no es un sistema termodinámico. Pero si uno «enciende» la mecánica cuántica, aun si lo hace solamente para

campos de partículas viviendo fuera del agujero negro, se vuelve un sistema termodinámico con una temperatura dada.

Así, la entropía está relacionada con el área y a la ignorancia de lo que hay dentro del agujero negro y es de naturaleza cuántica. Una teoría de la gravedad cuántica debería arrojar luz sobre la entropía y su relación con el área del horizonte. Pero hemos discutido cómo emergen las áreas en gravedad cuántica de lazos.

Una superficie adquiere un área cuando es atravesada por las líneas de la red de espín del estado cuántico correspondiente al espacio-tiempo en el cual está la superficie. Una superficie de un área dada podría provenir de muchos estados cuánticos distintos pero que al final dan el mismo valor del área. Esta es la ignorancia que la gravedad cuántica dice que tenemos acerca de un horizonte de eventos clásico con un área dada. Y un cálculo detallado en gravedad cuántica de lazos muestra que es proporcional al área. Esto fue sugerido por primera vez por Kirill Krasnov y Carlo Rovelli y más tarde refinado por Abhay Ashtekar, John Baez (primo de la cantante), Alejandro Corichi y Kirill Krasnov. Así que esto da una explicación fundamental de por qué la entropía de un agujero negro es proporcional al área.

Pero hay una disonancia en el cálculo de la gravedad cuántica de lazos y es que la teoría tiene un parámetro libre conocido como Parámetro de Immirzi y aparece en el cálculo de la entropía. Así que el resultado solo da proporcionalidad al área, no al coeficiente de proporcionalidad. Pero es interesante que el cálculo ha sido repetido para agujeros negros de distinto tipo y es consistente. El lector podrá preguntar: ¿por qué pueden hacer este cálculo y no otros? Debido a que este cálculo solo depende de cómo, las líneas de la red de espín cruzan la superficie; no requiere resolver la teoría para todo el espacio afuera del agujero negro. Eso hace las cosas mucho más sencillas.

Aparte de la entropía de los agujeros negros, la gravedad cuántica de lazos está comenzando a dar otras respuestas concernientes a los agujeros negros. Como hemos mencionado, los agujeros negros se forman cuando las estrellas colapsan. Después de la formación del agujero negro, la materia se sigue contrayendo en el interior hasta que se concentra toda en un punto con densidad infinita (técnicamente conocido como «singularidad»). Por supuesto, en la naturaleza nada puede ser singular. La expectativa es que cuando las densidades se vuelven grandes, los efectos cuánticos se vuelven importantes y la relatividad general clásica de Einstein deja de tener validez.

Desafortunadamente, todavía no podemos estudiar el colapso gravitacional en la gravedad cuántica de lazos. Pero si suponemos que el agujero negro es estático y ha existido desde siempre y no rota, hay suficiente simetría para resolver el problema. Los autores de este libro lo hicimos en 2013. Así, encontramos que la singularidad se elimina y es reemplazada por una región de curvatura grande por la que uno podría pasar a otra región del espacio-tiempo. Estos cálculos son muy limitados porque no estudian el colapso de la estrella. Pero es un cálculo que muestra que lo que es infinito en la teoría de Einstein, puede ser reemplazado por algo finito por la gravedad cuántica de lazos. Es el comienzo de nuestro entendimiento de la situación, pero no es un cálculo completo.

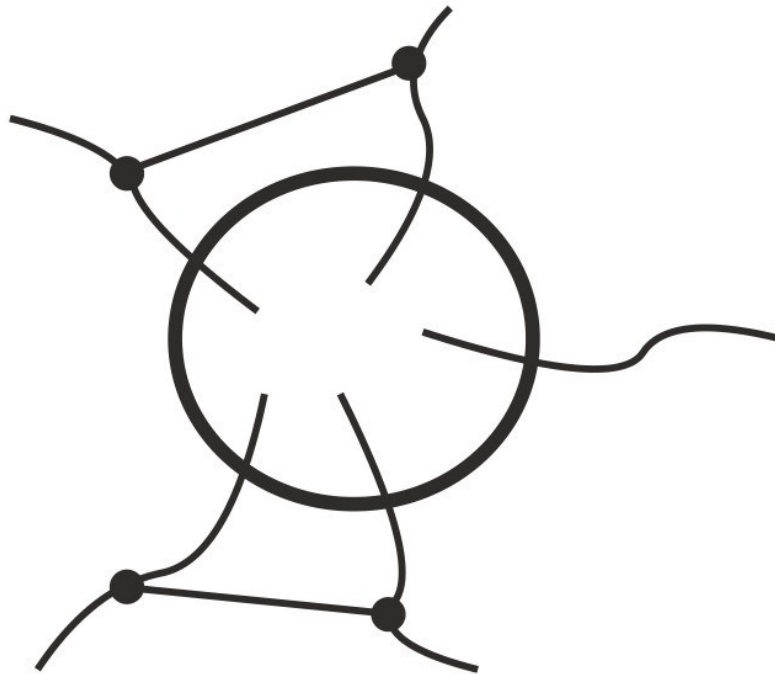


Figura 5.4: Un valor del área dado del horizonte de eventos puede lograrse a través de distintas redes de espín que la atraviesan. Nuestra ignorancia de cuál es, queda representada en la entropía del agujero negro.

El gran cálculo que ni la gravedad cuántica de lazos ni la teoría de cuerdas puede hacer hoy día tiene que ver con lo siguiente: vimos que el cálculo parcial de Hawking (porque el campo cuántico no afectaba el agujero negro) dice que un agujero negro emite radiación térmica. La temperatura que resulta tener es inversamente proporcional a la masa del agujero negro. Dicha radiación se lleva energía del agujero negro, con lo cual debe encogerse. Al encogerse, tiene menos masa y por ende la temperatura aumenta (¡inversamente proporcional a la masa!), y el agujero radia aún más. Esto lleva a un proceso fuera de control en el cual el agujero negro eventualmente

se «evapora». Para agujeros negros astrofísicos este proceso es increíblemente lento. Tomaría varias veces la edad del universo para que un agujero negro astrofísico se evapore. Pero eso nos lleva a la pregunta conceptual: ¿qué pasó con toda la información acerca de cómo el agujero negro se formó y que estaba escondida detrás del horizonte de eventos?

Una de las propiedades fundamentales de la mecánica cuántica es la «unitariedad» y quiere decir que la teoría preserva información. Si al final del día lo único que queda es radiación térmica caracterizada por un solo número (la temperatura), ¿a dónde fue a parar toda la información que entró al agujero negro? Esto es conocido como la paradoja de la información. En nuestra opinión es quizá el problema central de la física teórica fundamental, dado que involucra a la relatividad general, a la mecánica cuántica y a la termodinámica en sus regímenes más extremos. Nótese que el proceso mencionado es especulativo: el cálculo de Hawking no incluye los efectos del campo de partículas sobre el agujero negro. Así que, en particular, en dicho cálculo el agujero negro no se encoge. No sabemos aún cómo hacer un cálculo que incluya el encogimiento del agujero negro. Eso es lo que todo el mundo en la actualidad está tratando de calcular. El cálculo de gravedad cuántica de lazos que mencionamos para un agujero eterno no incluye la evaporación pero conecta el interior del agujero negro a otra región del espacio-tiempo por la que podría escapar la información. Pero esto es sólo una sugerencia, no se puede considerar una explicación porque no tiene en cuenta la radiación de Hawking.

Capítulo 6

APLICACIÓN: COSMOLOGÍA

Esta es la segunda aplicación que queremos discutir y se la conoce como cosmología o el estudio del universo como un todo.

Te podrás preguntar: ¿Cómo pueden estudiar el universo completo? La respuesta es: muy groseramente. Ignoramos la mayoría de los detalles y nos concentramos en unos pocos de los mismos. En el ejemplo más simple, la única cantidad considerada es la escala del universo. De hecho esto no es una aproximación muy mala: si uno mira a las cosas a muy gran escala, el universo es bastante homogéneo e isótropo (tiene el mismo aspecto en todos los lugares y en todas las direcciones). Esto no es cierto a pequeñas escalas: obviamente el Sistema Solar es diferente cerca del Sol que cerca de Plutón, por ejemplo. Pero si uno considera escalas de galaxias, o más aún, cúmulos de galaxias, las cosas se ven bastante uniformes.

Sabemos que el universo se expande. Aprendimos esto notando que cuanto más lejos está una galaxia, más rápidamente se aleja de nosotros. Una analogía podría ser un bollo con pasas en el horno. A medida que se cocina se expande y las pasas dentro de la masa se alejan unas de otras. Las que están más lejos se alejan más rápido.

La teoría de Einstein predice que el universo se expande, él ya lo notó en 1917. Lo que pasa es que entonces se creía que el universo era estático. Einstein hizo lo que cualquier físico teórico haría: modificó las ecuaciones para hacer que el universo fuera estático. Esto resultó un terrible error: el universo que le salía tenía otros problemas: no era estable. Doce años más tarde, Edwin Hubble, un astrónomo experimental, observaría que el universo se expande. Einstein había perdido una increíble oportunidad para hacer una

llamativa predicción que hubiera sido confirmada. Algunos dicen que llamó a esto «el error más grande de mi vida», aunque no está confirmado.

Dado que el universo se expande hacia el futuro, si lo hacemos retroceder en el tiempo, se contrae. La teoría de Einstein nos dice que eventualmente se contraería hasta que todo queda concentrado en un punto, bastante similar a lo que encontramos en el interior de los agujeros negros, y la densidad se vuelve infinita; es lo que técnicamente se conoce como «una singularidad». Esto es lo que usualmente se llama el *Big Bang* (la «gran explosión» en inglés), que da origen al universo. Como hemos dicho, nada puede ser infinito en la naturaleza, así que la expectativa es que cerca del Big Bang efectos cuánticos entrarán en acción y alterarán las cosas.

Algunos físicos han estudiado la situación en la gravedad cuántica de lazos. Por supuesto que efectuar un cálculo completo requeriría resolver la ecuación de Thiemann para un estado cuántico que fuera homogéneo e isótropo. No sabemos aún como hacer eso, aunque han habido progresos recientes.

Lo que los físicos hacen es trabajar en una aproximación. Primero, eliminamos todas las variables menos la escala. Así, el sistema resultante es muy sencillo, pero no se le puede aplicar la gravedad cuántica de lazos porque, debido a la gran simplificación, ya no quedan las líneas de Faraday, uno solo tiene un número para trabajar. Lo que se puede hacer es introducir un análogo de la distancia de Ashtekar y Lewandowski entre los estados cuánticos.

Esto nos lleva a la llamada Cosmología Cuántica de Lazos. Fue discutida por primera vez por Martin Bojowald y luego refinada por Ashtekar, Pawłowski y Singh y varios otros autores. Se supone que es una aproximación a la teoría completa. Si es una buena aproximación, no lo sabemos aún. Para saber cuán buena es una aproximación uno tiene que ir más allá de ella y mostrar que realmente funciona, pero aún no sabemos hacer esto. Lo que esta aproximación nos dice es que, cuando el universo es grande, todo está bien descrito por la teoría de Einstein. Pero cuando el universo se vuelve muy pequeño, en lugar de concentrarse en un punto de densidad infinita, el universo alcanza un tamaño mínimo y si uno lo evoluciona para atrás en el tiempo comienza a re-expandirse hacia un universo grande previo al Big Bang. Esto es, el universo comenzó grande, experimentó un período de contracción, alcanzó una densidad muy grande, fue muy cuántico y luego se re-expandió para formar el universo que vemos hoy. Así que el Big Bang es reemplazado por un «Gran Rebote» (*Big Bounce* en inglés). Esto es algo que

la gente esperaba que pasaría, pero cuando trataron de estudiarlo usando técnicas tradicionales en los años 60, no se materializó. La distancia de Ashtekar y Lewandowski entre los estados es el nuevo ingrediente que nos lleva a ello.

Se han analizado otros modelos de universo, con anisotropías y otras propiedades y el «Rebote» parece ser una propiedad robusta. Esto resulta atractivo porque es algo que parece ocurrir siempre y no se había podido hacer antes, pero te podrás preguntar: ¿vamos a poder saber alguna vez si hubo un «rebote» en lugar de una «explosión»? ¿No pasa todo esto tan temprano que no hay posibilidad de que podamos medirlo? En esos momentos en que la densidad es tan grande, los fotones y electrones se mezclan en una sopa primordial que es opaca, la luz no la puede atravesar. Es solo más tarde cuando las cosas se expanden y enfrían y se forman los átomos que el universo se vuelve transparente a la luz. Si miramos al cielo, no podemos ver nada previo a cuando los átomos se formaron porque la luz no pudo salir de esa fase. La luz que logra escapar cuando los átomos se forman consigue viajar hasta nosotros pero se «enfriá» al expandirse el universo. Para la luz, «enfriarse», es aumentar su longitud de onda (o disminuir su frecuencia). El hecho de que algo que se expande se enfría es relativamente familiar: si uno toma una lata de aerosol y deja salir el gas, sentirá que la lata se enfría a medida que el gas se expande en la atmósfera. Para cuando la luz de ese universo temprano llega a nosotros, la longitud de onda se ha agrandado tanto que ya no es luz, son microondas. Esto es lo que se conoce como el «fondo cósmico de microondas». En los años 60 dos ingenieros de la Compañía Telefónica Bell en EE. UU. estaban estudiando un «ruido» en una antena de microondas. Se dieron cuenta de que aquello no era ruido, sino que la antena lo que estaba recibiendo era la luz del Big Bang que había aumentado su longitud de onda debido a la expansión del universo hasta convertirse en microondas. Este fondo cósmico de radiación de microondas ha sido medido con gran precisión usando satélites para conseguir evitar las interferencias de la atmósfera.

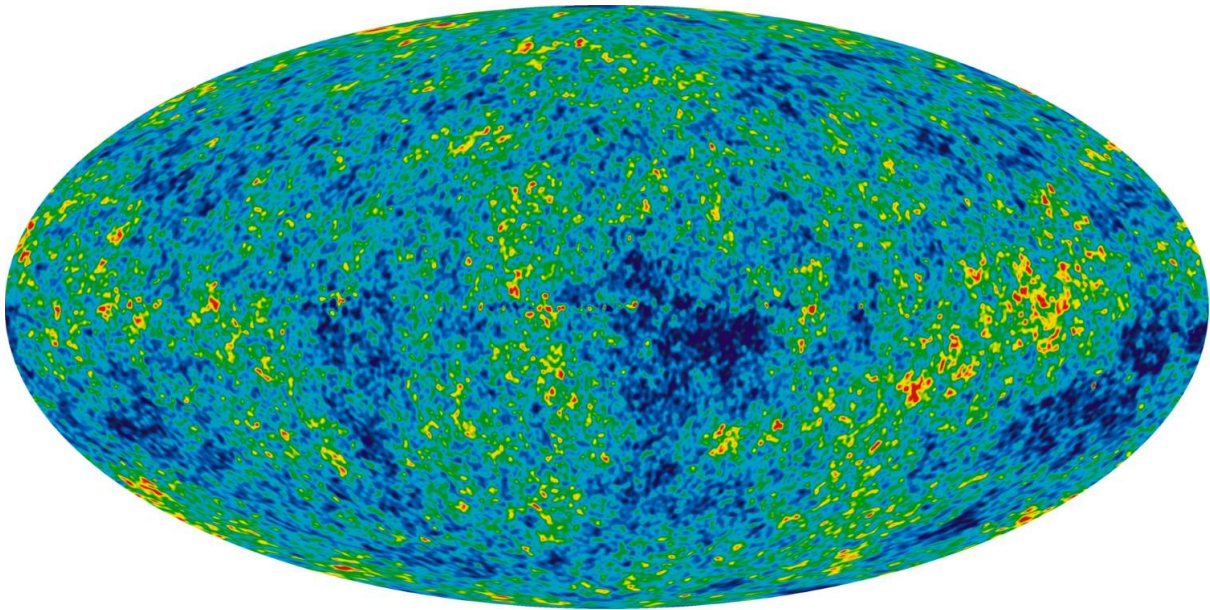


Figura 6.1: Los colores ilustran las diferencias en temperatura del fondo cósmico de radiación de microondas en diferentes direcciones de la esfera celeste (amplificados 100 000 veces). (Crédito: dominio público).

El fondo cósmico de radiación de microondas nos ha permitido confirmar que, a las escalas más grandes, el universo es homogéneo e isótropo. Si uno mira en una dirección y luego en otra, la «temperatura» (frecuencia) de las microondas coincide en una parte cada 100 000. La figura 6.1 muestra la «esfera celeste» (el cielo proyectado en un óvalo). Lo que se hace para obtener esa imagen es multiplicar las variaciones de temperatura por 100 000 asignándole colores. Los diferentes colores representan diferentes valores de la temperatura (nuevamente, multiplicados por 100 000 para que se vean las diferencias). Mirando a la figura tú puedes pensar «esto parece aleatorio, ¿no?», no parece haber mucha estructura en la misma. Pero la hay. Para ver la estructura uno tiene que hacer un poco de matemática; afortunadamente no demasiada. Toma un punto en la figura, luego toma otro punto a una distancia angular dada del primero, digamos 30 grados. Recordemos que el óvalo representa la esfera celeste así que al movernos en el mismo nos movemos en ángulo. Ahora toma todos los puntos a la misma distancia angular del primero y promedia la temperatura de todos. Si el diagrama realmente fuera aleatorio, si uno evaluara esta cantidad para todos los ángulos posibles daría una constante^[2]. Pero eso no es lo que sale. La figura 6.2 muestra que el resultado tiene mucha estructura no trivial. Esta estructura implica que el diagrama original no es aleatorio, tiene lo que se conoce como «correlaciones», y las mismas tienen una forma específica.

Lo interesante es que esta estructura se puede predecir. Antes de discutir cómo, tenemos que hablar acerca de un pequeño problema en el modelo de

universo en expansión predicho por la teoría de Einstein (con o sin «Rebote»).

Si uno mira en la distancia a algún punto de la esfera celeste, y luego mira en la distancia a otro punto, uno puede considerar puntos que están tan separados el uno del otro que no hubo suficiente tiempo en la completa historia del universo para que la luz (o cualquier otra cosa) viajara de uno de ellos al otro. La pregunta entonces es: ¿cómo pudo tener el fondo cósmico de microondas para esos dos puntos casi la misma temperatura si no hay manera para ellos de comunicarse entre sí? Esto requiere una explicación y la misma es un proceso conocido como inflación cósmica (para clarificar: no tiene nada que ver con la inflación del dinero). La inflación dice que por un período el universo se expandió en forma acelerada, de modo tal que esos puntos que hoy en día están a grandes distancias sí tuvieron oportunidad de comunicarse el uno con el otro en el pasado. Se lleva a cabo un cálculo parecido al que Hawking hizo con agujeros negros, poniendo un campo cuántico a vivir encima de un universo que se infla y expande y, con ello, uno supone que al comienzo el campo cuántico está en su estado más básico llamado «el vacío». Si uno evoluciona el estado a través del período inflacionario, encuentra que el estado resultante ya no es más el vacío y tiene el tipo de «correlaciones» que uno observa en el fondo cósmico de radiación de microondas. Así que el campo cuántico deja una impronta en el fondo, que se enfría en el resto de la expansión y nos llega en la forma que observamos hoy. Si hacemos gráfica la correlación calculando la cantidad que acabamos de describir como función del ángulo entre dos puntos, uno obtiene una curva como la mostrada en la figura 6.2.

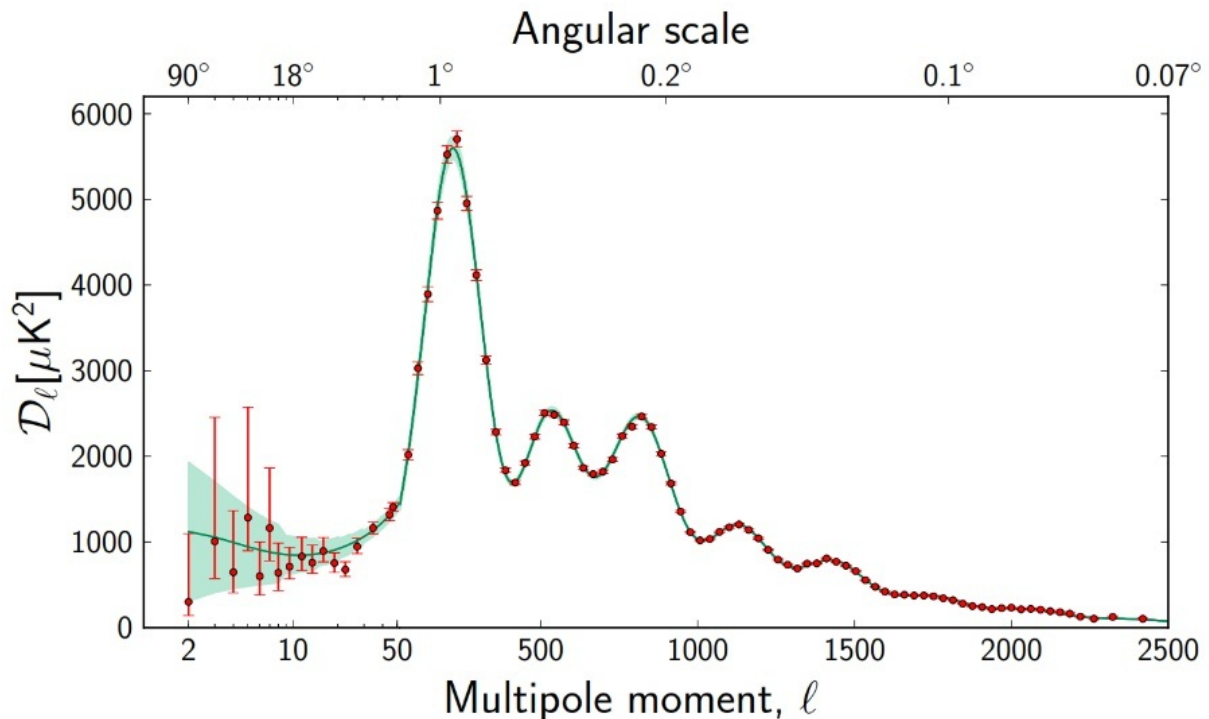


Figura 6.2: La estructura de la dependencia angular del fondo cósmico de radiación de microondas. De P. Ade *et al.* (Colaboración Planck) *Astron. Astroph.* 571, A15 (2014). Los «multipole moments» (momentos multipolares en castellano) son otra manera de caracterizar las separaciones angulares.

Esa curva es la predicción teórica con el mejor ajuste de los parámetros libres y los puntos en ella son los valores medidos del fondo cósmico de radiación de microondas. Son las medidas hechas con satélites. Como se ve la coincidencia es asombrosa. Y debe tomarse en cuenta que el modelo usado para explicar esto es asombrosamente simple: un campo cuántico empezando en el estado más simple posible, evolucionando a través de la inflación y la subsecuente evolución del universo. Es difícil pensar en algo más simple y con menos hipótesis. Como se puede ver en la figura, cuando uno considera ángulos muy grandes, es decir separaciones grandes en los puntos que se consideran, el dato experimental tiene grandes barras de error.

¿Qué tiene que decir la gravedad cuántica de lazos de todo esto? La gente ha repetido los cálculos mencionados arriba con el modelo cosmológico rebotante de la Cosmología Cuántica de Lazos, suplementado con un período de inflación. En particular, Agulló, Ashtekar y Nelson y otros autores como Barrau, Mena y Olmedo^[3]. En un universo como ese no hay razón para poner el campo cuántico en un estado de vacío inicial al comienzo de la inflación, dado que existe mucha dinámica previa. Lo natural sería poner el estado de antes de colapsar al Rebote y re-expandirse de nuevo. Pero si uno hace eso el estado del campo cuántico no es más el vacío al comienzo de la inflación. Hay pequeños y sutiles cambios, una memoria remanente de la evolución del

universo durante esa etapa pasada. Esos cambios dejan una impronta en el fondo cósmico de radiación de microondas para separaciones angulares grandes, ahí las predicciones de la cosmología cuántica de lazos difieren de la inflación tradicional.

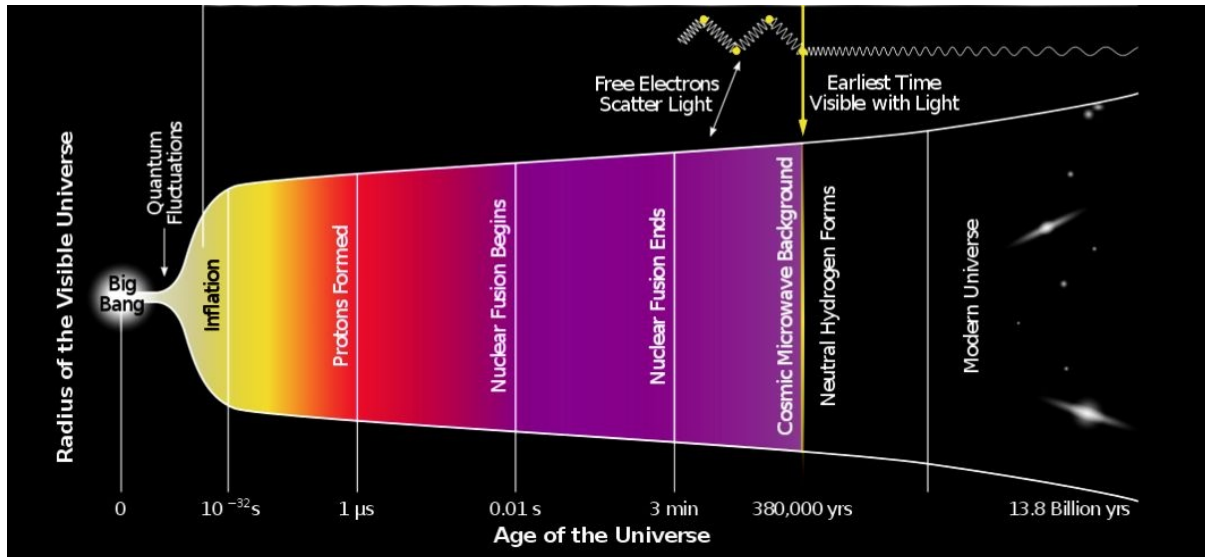


Figura 6.3: Una presentación visual de la historia del universo, comenzando con el Big Bang, el período inflacionario y el subsecuente enfriamiento del universo, que primero crea protones y eventualmente hidrógeno. Cuando éste último se forma el universo deja de ser opaco y pasa a ser transparente. Ahí es donde el fondo cósmico de radiación de microondas que observamos hoy se formó. (Crédito: Drbogdan, Yinwichen/Wikimedia CC BY-SA 3.0).

Desafortunadamente, esa es la región donde los datos experimentales tienen grandes barras de error, así que por el momento no podemos decir qué es lo que está más de acuerdo con los resultados experimentales: si la inflación tradicional o la cosmología cuántica de lazos. Pero se abre la posibilidad de que a medida que los datos de los satélites vayan siendo mejores, en un futuro quizá no muy distante, podamos ver qué teoría se ajusta mejor a los datos.

Como en el caso de la entropía de los agujeros negros, hay un parámetro libre en este cálculo. Es difícil hacer un cálculo de todo el universo sin hacer suposiciones acerca de sus condiciones iniciales. En este caso el valor del «inflatón», el campo que da lugar al comportamiento inflacionario, al comienzo del universo.

Modificando dicho valor uno puede hacer que la cosmología cuántica de lazos casi coincida con los resultados de la inflación tradicional. Así que si los resultados experimentales coinciden con la inflación tradicional, la cosmología cuántica de lazos puede ser ajustada para estar de acuerdo, pero de una manera poco natural. Por otro lado, si los resultados experimentales estuvieran más de acuerdo con la cosmología cuántica de lazos, pueden construirse modelos inflacionarios más complicados que se ajusten a los

datos. Nuevamente será algo menos natural. Esto es lo más cercano que tenemos a una «predicción» de la gravedad cuántica de lazos que podría ser medida. ¡Debemos enfatizar una vez más lo sorprendente que es que con un modelo tan sencillo una estructura tan complicada como la de las correlaciones pueda ser ajustada tan bien!

Capítulo 7

OTROS DESARROLLOS: LAS ESPUMAS DE ESPÍN

Hemos discutido algunas de las dificultades encontradas en la versión cuántica de las ecuaciones de Einstein introducida por Thiemann. Esto ha llevado al desarrollo de un enfoque alternativo a la dinámica de la teoría, conocido como «espumas de espín».

Muchos de los resultados en este área son muy técnicos y no se pueden cubrir bien en un libro para el público en general, aquí simplemente daremos una idea básica de lo que se intenta hacer. Para profundizar más, existe un libro técnico sobre el tema de Rovelli y Vidotto^[4].

Las espumas de espín están basadas en un enfoque alternativo a la construcción de teorías cuánticas conocido como integral de camino. Este enfoque fue iniciado por Feynman y ha encontrado numerosas aplicaciones en muchos contextos cuánticos, incluyendo la física de partículas y la de materia condensada. Consiste en estudiar todas las posibles trayectorias clásicas de un sistema entre un estado inicial y un estado final. Esto incluye trayectorias no permitidas por las ecuaciones clásicas del movimiento del sistema. Uno le asigna probabilidades a las trayectorias usando una receta específica que involucra una función de las variables del sistema conocida como «acción». Con estas probabilidades se puede asignar «valores esperados» a las cantidades físicas, esto es, predicciones para los valores que tomarían las cantidades si fueran medidas.

Focalizándose en el espacio de trayectorias del sistema, este enfoque no hace distinción entre espacio y tiempo, algo deseable en teorías como la relatividad general, donde el espacio y el tiempo están en pie de igualdad.

Cuando se aplica este enfoque a la gravedad cuántica de lazos, el estado inicial y final están dados por redes de espín. Y la trayectoria que las conecta parece una «espuma», como si uno hubiera hecho las redes de espín con alambre y las sumergiera en agua jabonosa. Esto da origen al nombre «espuma de espín». Como en el caso de Thiemann, capturar la dinámica completa de la relatividad general es un desafío en el caso de las espumas de espín. A medida que las redes de espín evolucionan hacia adelante en el tiempo, pueden desarrollar nuevos vértices y lados, enriqueciendo la espuma.

Estos procesos capturarían la dinámica de la relatividad general. Hay varias propuestas para estos procesos, conocidos como «vértices» pero no está claro que capturen la dinámica correcta de la teoría de Einstein.

Un aspecto interesante de este enfoque aplicado a la gravedad cuántica es que ha probado ser fructífero en tres dimensiones espacio-temporales. La teoría de Einstein en tres dimensiones espacio-temporales es mucho más sencilla que la versión cuatridimensional. Todos los espacio-tiempos son planos excepto en un número finito de puntos. Esto hace la dinámica de la teoría muy sencilla. De hecho, esta teoría había sido cuantizada con éxito en 1968 por Giorgio Ponzano y Tullio Regge. Notablemente, cuando la gente aplicó las espumas de espín a espacio-tiempos tridimensionales notaron que la cuantización resultante coincide con la de Regge y Ponzano.

Las espumas de espín son un ejemplo particular de una clase más general de teorías conocidas como redes tensoriales, que están encontrando importantes aplicaciones en física de la materia condensada y la teoría de cuerdas. Algunos conjeturan que podrían ser un puente entre la gravedad cuántica de lazos y la teoría de cuerdas. Otra conexión potencial es la que Daniele Oriti y colaboradores han estado construyendo: teorías cuánticas de campos similares a las que describen las partículas elementales, pero especiales, conocidas como teorías de campos de grupos. Cuando se estudia la dinámica de estas teorías usando una técnica conocida como diagramas de Feynman (una manera gráfica de representar las interacciones de la teoría), los diagramas resultantes son espumas de espín. Existe un precedente para este tipo de construcciones en el contexto de espacio-tiempos bidimensionales, allí se las conoce como modelos matriciales y fueron el foco de intensa actividad en los años 90 del siglo xx.

Las integrales de camino son ideales para estudiar procesos de colisiones como los que ocurren en partículas elementales donde uno tiene un estado inicial y final bien definidos. Rovelli y colaboradores han estado utilizando el uso de cálculos de espumas de espín en este espíritu para tratar de entender el

destino final de los agujeros negros. Uno comienza con un estado correspondiente a un agujero negro y lo que encuentran es que el estado final es un «agujero blanco», una especie de agujero negro evolucionado hacia atrás en el tiempo, donde las cosas salen en lugar de caer hacia adentro y quedar atrapadas (este escenario ha recibido el nombre de «fuegos artificiales»). Esto podría ofrecer una solución a la paradoja de la información que mencionamos. Los cálculos son preliminares y hay una gran actividad en torno de los mismos.

Capítulo 8

¿POSIBLES CONSECUENCIAS OBSERVACIONALES?

Como hemos mencionado, no se conoce en el presente ningún experimento que podamos realizar que requiera de la gravedad cuántica para su explicación, si bien notamos en el capítulo 6 que una impronta observacional podría quedar plasmada en el fondo cósmico de microondas. Las constantes fundamentales involucradas en la gravedad cuántica son la constante de Newton G , la constante de Planck de la mecánica cuántica y la velocidad de la luz c . Combinándolas se puede construir una distancia, llamada distancia de Planck, que es de 10^{-33} cm. ¡Esto es 20 órdenes de magnitud menor que el radio de un protón! Esta es la escala en la que uno espera que la gravedad cuántica sea relevante. Comparadas con la misma, las distancias macroscópicas son enormes. El tipo de granularidad del espacio-tiempo que implica la cuantización de áreas y volúmenes que mencionamos en gravedad cuántica de lazos tiene esa escala. Esa es la razón por la cual las áreas y volúmenes de los objetos macroscópicos aparecen como continuos.

TIEMPO DE LLEGADA DE RAYOS GAMMA

Cuando la luz viaja por un medio granular, diferentes colores viajan a distintas velocidades. Si uno considera un pulso de luz blanca, que es una

superposición de muchos colores, el pulso se dispersará, dado que los distintos colores viajan a velocidades distintas. Esto se conoce como dispersión. Así que, en principio, la luz que viaja en un espacio-tiempo cuántico podía experimentar un fenómeno de este tipo. El tamaño del efecto es del orden de la longitud de Planck dividida por la longitud de onda de la luz. Para la luz visible, las longitudes de onda son del orden de 10^{-5} cm. Comparada con la longitud de Planck, es enorme, así que el efecto es muy pequeño. Sin embargo, es acumulativo, cuanto más viaja la luz, mayor es el efecto.

En la década de los 60 del siglo xx, los satélites puestos en órbita por los EE. UU. para monitorizar el tratado que prohibía las pruebas nucleares comenzaron a recibir fogonazos de rayos gamma. Rápidamente se determinó que no provenían de explosiones nucleares. Otros estudios determinaron que no eran de origen terrestre, venían del espacio, se entendió que su origen era extragaláctico. Se los llamó brotes de rayos gamma («gamma ray bursts» en inglés). Finalmente, en 2017 el experimento LIGO recibió ondas gravitacionales asociadas con un brote de rayos gamma y determinó que se originó en una colisión de estrellas de neutrones. No todos los brotes de rayos gamma se originan en colisiones de estrellas de neutrones, también existen otros modelos para su origen.

Las razones por las que traemos a colación los brotes de rayos gamma en este contexto son dos. Por un lado, ocurren muy lejos. Por otro, la longitud de onda de los rayos gamma es bastante más corta que la de la luz visible, del orden de 10^{-9} cm. Estos dos factores conspiran para hacer los efectos de la granularidad del espacio-tiempo más visibles. Modelos con algún detalle de la propagación de rayos gamma han sido estudiados en teoría de cuerdas por Giovanni Amelino-Camelia y colaboradores, y en gravedad cuántica de lazos por los autores de este libro. En gravedad cuántica de lazos se observó que, para que el efecto esté en el rango que se puede observar con los satélites que detectan rayos gamma, uno tiene que suponer que el estado cuántico es de un tipo muy artificial, que trata diferente a las cosas girando a la derecha que a las que giran a la izquierda.

El Observatorio de Rayos Gamma Compton es un satélite en el que uno de los experimentos a bordo puede medir rayos gamma de distintas frecuencias. Si el tiempo de llegada de los brotes en diferentes frecuencias fuera distinto, podría verse como una evidencia de dispersión. Desafortunadamente, hasta el presente no se han observado diferencias en los tiempos de llegada. Peor aún, la extraña simetría del estado cuántico que hace

los efectos lo suficientemente grandes tiene también implicaciones para la llegada de ondas de radio desde el universo. Estas ondas están estudiadas con gran precisión y los efectos de gravedad cuántica de lazos con ese estado cuántico particular serían visibles y no lo son. Algunos han concluido que esto desmiente la teoría, pero eso no es cierto, simplemente descarta el estado cuántico considerado, lo que no era muy razonable para empezar. Para estados más razonables los efectos son muy pequeños, pero puede ser que futuros experimentos tengan mayor precisión.

MEDICIÓN DE TIEMPOS Y DISTANCIAS

En 1958 el premio Nobel Eugene Wigner, junto a H. Salecker, se preguntaron lo siguiente: ¿qué tan preciso puede ser un reloj? Para estudiar esto consideraron un reloj altamente idealizado consistente en dos espejos entre los que rebotaba un haz de luz. Cada vez que la luz incidía en un espejo sería un «tic» del reloj. Para tratar de mantener las cosas lo más exentas de influencias externas supusieron que dicho reloj estaba aislado del resto del mundo. Aún un reloj así tiene inexactitudes. En la teoría cuántica, objetos que no están sujetos a ninguna interacción se vuelven difusos. Eso quiere decir que eso le pasa a los espejos. Los espejos de la vida cotidiana no se vuelven difusos porque están constantemente bombardeados por moléculas de aire. Eso evita que se vuelvan difusos, pero agrega ruido, así que no ayuda. A medida que los espejos que consideraron se vuelven difusos, el «tic» del reloj se vuelve impreciso. Determinaron que la exactitud del reloj es inversamente proporcional a su masa. Así que, si uno desea un reloj más preciso, tiene que hacerlo más masivo.

Pero entonces los físicos de Carolina del Norte Jack Ng y Hank van Dam argumentaron que uno no puede hacer los relojes tan masivos como uno quiera, porque se convertirían en agujeros negros. Esto crea un punto óptimo en términos de cuán preciso puede ser un reloj. Ya que el efecto es debido a la teoría cuántica y a la gravedad, involucra las tres constantes fundamentales que mencionamos en la sección anterior. De las mismas uno puede construir el llamado tiempo de Planck, es 10^{-44} segundos. Esto es increíblemente corto. Por dar una idea, los mejores relojes atómicos proyectados tienen

inexactitudes de 10^{-18} segundos. Lo que Ng y van Dam observaron es que la inexactitud que encontraron es de hecho proporcional al tiempo de Planck, pero con un factor grande, del orden de 10^{15} para tiempos del orden de una hora. Esto no alcanza para situarlo al alcance de la precisión de los relojes atómicos.

Pero medir tiempos es lo mismo que medir distancias. Si uno traduce la inexactitud temporal en una distancia multiplicándola por la velocidad de la luz, obtiene una distancia como la que miden los interferómetros LIGO cuando detectan ondas gravitacionales. La historia, sin embargo, es más compleja. LIGO involucra una alta potencia de luz en su láser, lo que implica muchos fotones, el efecto de la inexactitud se promedia entre todos y se desdibuja. Así que no se puede utilizar LIGO para medir la inexactitud fundamental de los relojes, pero el hecho de que uno esté en el orden de magnitud correcto quizá pueda sugerir otros experimentos para verificar estas limitaciones fundamentales en la medición de tiempos y distancias.

EL TEOREMA DE BELL PARA ORDENAMIENTOS TEMPORALES

El Teorema de Bell es un resultado en mecánica cuántica que verifica uno de los aspectos «esotéricos» de la teoría: el entrelazamiento cuántico. En dicha teoría uno puede tener sistemas compuestos de subsistemas en los que el todo es más que la suma de las partes. Más aún, algunas de las propiedades de las partes no pueden ser determinadas sin saber las propiedades del todo.

El Teorema de Bell involucra una serie de desigualdades que los sistemas entrelazados satisfacen y los no-entrelazados, como los clásicos, no. Verificando que se satisface uno puede determinar si tuvo lugar el entrelazamiento. Este último está profundamente relacionado con la naturaleza probabilística de la mecánica cuántica que mencionamos en el capítulo 3, la teoría no predice un resultado específico. Uno puede tener estados de sistemas en donde aparecen «superpuestos» en dos posibles configuraciones clásicas. Es el origen del famoso experimento mental del Gato de Schrödinger, en donde un gato termina en un estado cuántico en el que está vivo y muerto a la vez. A los gatos reales eso no les pasa porque

interactúan todo el tiempo con el medio ambiente, como los espejos de Salecker y Wigner (moléculas de aire, etc.).

Zych, Costa, Pikowski y Brukner han sugerido que, en gravedad cuántica, uno puede tener una masa en un estado cuántico en el que su posición no está bien definida. Esto puede llevar a la superposición de efectos gravitatorios de la masa en distintas posiciones, cuyos estados estarán entrelazados entre sí. Un elemento central de la Relatividad de Einstein es la noción de causalidad: algunos procesos en el espacio-tiempo pueden ser la causa de otros, mientras que otros no lo pueden ser. La razón es que nada puede viajar más rápido que la luz. Así que si tengo un proceso que ocurre al mediodía en un cierto lugar, el mismo no puede influenciar al mediodía más un segundo, a un proceso que esté a más de 300 000 kilómetros de distancia. Está demasiado lejos para que la luz lo alcance en el tiempo disponible. Esto se vuelve difuso cuando se traen a colación efectos cuánticos. Así pues dados dos procesos A y B, la teoría nos da una superposición de situaciones donde «A puede influenciar a B» y otra de que «A no puede influenciar a B». Esta propiedad del estado cuántico puede verificarse viendo si satisface las desigualdades de Bell.

Experimentos de laboratorio en los que se preparan masas muy pequeñas en estados cuánticos en los cuales la posición de la masa tiene una probabilidad de estar en distintos lugares podrían ser un ejemplo de un espacio-tiempo difuso. Los autores mencionados han sugerido una manera de convertir esto en un experimento acerca de la cuantización del espacio-tiempo, pero admiten que, con la tecnología actual será muy difícil. Este y otros experimentos de «sobremesa» (en el sentido de que se realizan en una mesa en un laboratorio) están creando y explorando una nueva frontera en la que la gravedad y la mecánica cuántica exhiben sus propiedades conjuntas sin tener que recurrir a la minúscula granularidad que implica la longitud de Planck.

Como se mencionó en el experimento de la doble ranura del capítulo 3, las partículas en mecánica cuántica se comportan tanto como partículas como ondas. La longitud de onda de su comportamiento ondulatorio es inversamente proporcional a su energía. Una estimación grosera sugiere que llegar a la longitud de Planck requeriría partículas de muchísima energía.

Dicha energía se conoce como Energía de Planck y es mayor en muchos órdenes de magnitud que las energías que se pueden lograr en los aceleradores de partículas actuales como el Gran Colisionador de Hadrones (LHC por sus siglas en inglés) del Centro Europeo de Investigaciones Nucleares (CERN, por sus siglas en francés). Por comparación, los

experimentos de «sobremesa» son considerados «de baja energía». El tiempo dirá si estos tipos de experimentos pueden desentrañar algunos de los misterios de los espacio-tiempos difusos de la gravedad cuántica.

Capítulo 9

CONCLUSIONES

Hemos resumido cómo la aplicación de nuevas técnicas, basadas en las líneas que se originaron con Faraday hace mucho tiempo y aplicadas a la gravedad reescrita por Abhay Ashtekar, han permitido construir una teoría cuántica de la gravedad. Aún no tenemos un control completo de la misma, pero se ha aplicado en un par de situaciones interesantes y ha producido resultados atractivos. Queda mucho por hacer. Pero esperamos que el lector pueda apreciar como esta mezcla de las líneas de Faraday, las redes de espín de Penrose y la simetría bajo difeomorfismos han llevado a una nueva visión de la gravedad cuántica.

Un comentario pertinente es que dado que la gravedad cuántica de lazos es un tema con más de 30 años de historia, es un campo vasto y solo hemos cubierto una fracción de sus resultados, aquellos que hemos considerado más relevantes para un público general.

Como mencionamos en la introducción, existe controversia. Si uno busca en internet, puede encontrar blogs y otras páginas que son muy críticas con la gravedad cuántica de lazos. No recomendamos estas fuentes. Muchas no están bien informadas y saltan a conclusiones basadas en prejuicios.

Para los que quieran zambullirse de modo más riguroso en la controversia hay dos artículos en inglés, uno de Nicolai y Colaboradores^[5], que discute varias de las críticas y una respuesta de Thiemann^[6]. Desafortunadamente, los artículos son técnicos. Tratando de resumirlos un poco, las principales críticas se pueden reducir a dos.

La primera concierne a la «distancia» introducida por Ashtekar y Lewandowski. Difiere dramáticamente de las usadas en otras teorías

cuánticas. La crítica es que es «demasiado revolucionaria». La gente del tema responde diciendo que distancias más tradicionales se probaron en el pasado y no funcionaron, algo tenían que cambiar y esto es lo que este enfoque cambia.

Otros preguntan «¿han probado distancias así en otras teorías?». La respuesta es afirmativa y sí, se ha mostrado que las cosas funcionan, pero no son necesariamente elegantes. La distancia fue claramente pensada para teorías con la simetría de difeomorfismos y otras teorías no la tienen. Es como si uno trata de correr el rally Dakar con un Ferrari. No funcionará bien porque fue diseñado para hacer otras cosas. El lector puede apreciar que esta crítica es una válida diferencia de opinión. Como mencionamos, la distancia considerada es única si uno supone la simetría de difeomorfismos, pero eso no quiere decir que sea correcta.

La segunda crítica tiene que ver con la emergencia de estructuras discretas. Las mismas pueden entrar en conflicto con experimentos de física de partículas de gran precisión. Existe una simetría en la física conocida como invariancia Lorentz que tiene que ver con cómo dos observadores que se mueven entre sí perciben la física. Esta invariancia está presente en el electromagnetismo y en las teorías que describen las interacciones fuertes y débiles y también está presente en la relatividad general a «nivel local» (en regiones pequeñas). Esta invariancia ha sido verificada con alto grado de precisión. Estructuras discretas tienen el potencial de violar esta invariancia, que es de naturaleza intrínsecamente continua (esto está asociado a que la velocidad entre los observadores es una variable continua). La gente ha tratado de armar argumentos precisos mostrando que las estructuras discretas entran en conflicto con esta invariancia pero, hasta el momento, siempre se ha encontrado cómo reconciliar las cosas, pero eso no quiere decir que no se encuentren problemas en el futuro. En nuestra opinión, esta es quizá una de las cuestiones que más preocupan a quienes trabajan en Teorías de Cuerdas sobre la gravedad cuántica de lazos.

Finalmente, a alguna gente le preocupa que la teoría de Thiemann no captura completamente la dinámica de la relatividad general. Hay algunos indicios de que esto puede ser así, pero no hay prueba definitiva hasta el momento. Hasta que eso pase hay que seguir trabajando con la teoría para extraer resultados físicos y ver si aparece alguna contradicción. Al final lo que decidirá la teoría será encontrar alguna predicción experimental que pueda ser verificada. Hemos discutido algunas posibilidades pero no hay nada concreto aún. Alguien en alguna ocasión le mencionó al Premio Nobel paquistaní Abdus Salam que «no hay predicciones experimentales de la gravedad

cuántica». Su respuesta fue en la línea de «¿cómo sabe que una teoría no tiene predicciones si no conoce la teoría?».

No es que no haya posibilidades de cambios significativos en nuestro entendimiento de la Naturaleza, para mencionar solo un punto, sabemos que el 95 % de la materia en el universo no es materia ordinaria, sino dos extrañas formas de materia, que solo interactúan gravitacionalmente, conocidas como «materia oscura» y «energía oscura». Así que estamos admitiendo que no entendemos el 95 % del universo. No sabemos si la gravedad cuántica tiene algo que ver con esto o no, pero puede ser. Quizá cuando desentrañemos más aspectos de la gravedad cuántica de lazos esta tendrá algo que decir acerca de esto. Solo más trabajo dará la respuesta.

Si este libro despertó su curiosidad, tenemos un libro^[7] a nivel de la licenciatura que requiere pocos pre-requisitos de física, aunque su curva de aprendizaje es empinada.



Rodolfo Gambini obtuvo su doctorado en física en la Universidad de París. Se unió como profesor a la Universidad Simón Bolívar en Venezuela. Allí, junto a Antoni Trías inventó la representación de lazos para teorías de Yang-Mills y gravedad, pero sin usar las variables de Ashtekar, que no habían sido inventadas aún. Regresó a su Uruguay natal y se convirtió en profesor de la Universidad de la República. Fue uno de los fundadores de la Sociedad Uruguaya de Física y la Academia Nacional de Ciencias. Fue el primer presidente de ambas instituciones. Ha ocupado diversas posiciones en agencias de financiación científica. Recibió el Premio TWAS en física y numerosas distinciones en Uruguay, incluyendo la Medalla Presidencial de Ciencia en 2004 y en 2011 un Doctorado *Honoris Causa* de la Universidad de la República. Es miembro de la Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Argentina, de la Academia de Ciencias de América Latina, de la Academia Americana de Artes y Ciencias de EE. UU., y The World Academy of Sciences (TWAS).



Jorge Pullin obtuvo su doctorado en física en el Instituto Balseiro de Argentina. Ocupó posiciones postdoctorales en la Universidad de Syracuse en el Estado de Nueva York y la Universidad de Utah y fue profesor en la Universidad del Estado de Pensilvania. Desde el 2001 es el catedrático Horace Hearne Jr. en física teórica en la Universidad del Estado de Luisiana. Fue el editor fundador de la revista *Physical Review X* de la Asociación Física Americana y ha sido y es miembro de varios comités editoriales de revistas científicas. Recibió el Premio Edward Bouchet de la Asociación Física Americana. Es miembro de las Academias Nacionales de Ciencias de Argentina y México y de la Academia de Ciencias de América Latina.

Gambini y Pullin son coautores de 118 trabajos científicos y cuatro libros, publicados por Oxford University Press, Cambridge University Press, Imprint Academic, World Scientific, y versiones en castellano y japonés por Editorial Reverté y Maruzen Planet.

Notas

[1] Veremos que la relatividad general predice objetos como los agujeros negros e instantes como el Big Bang, donde los efectos cuánticos son importantes, pero no tenemos acceso experimental directo a ellos. <<

[2] En realidad para hacer la figura se restó el promedio así que la constante sería cero. <<

[3] Agulló es de originalmente de Elche, Mena es de Cáceres, y Olmedo de Fuenlabrada. <<

[4] Rovelli y Vidotto, *Covariant loop quantum gravity*, Cambridge University Press (2014). <<

[5] Nicolai *et al.* *Classical and Quantum Gravity* 22, R193 (2005). <<

[6] Thiemann, *Lecture Notes in Physics* 721, 185 (2007). <<

[7] R. Gambini, J. Pullin «Un primer curso en Teoría Cuántica de Lazos», Editorial Reverté (2021). <<