

ÓSCAR GERARDO LOAIZA BRITO

un universo de cuerdas

Un viaje a través de la teoría de cuerdas y
sus implicaciones en el universo



ÓSCAR GERARDO LOAIZA BRITO

un universo de cuerdas

Un viaje a través de la teoría de cuerdas y
sus implicaciones en el universo

UNIVERSIDAD DE
GUANAJUATO



Ediciones
Universitarias



Un universo de cuerdas

Primera edición electrónica, 2025

D.R. © Dirección de Apoyo a la Investigación y al Posgrado, Universidad de Guanajuato
Calzada de Guadalupe SN, Col. Centro, 36000 Guanajuato, Gto., México

D.R. © Universidad de Guanajuato
Lascuráin de Retana 5, Col. Centro, 36000 Guanajuato, Gto., México

ISBN 978-607-580-170-4

Agradecemos a la Dirección de Apoyo a la Investigación y al Posgrado por el apoyo
brindado a través de la convocatoria de Apoyo a Profesorado 2022.

Coordinación Editorial: Artemisa Helguera Arellano

Diseño y formación: Sonia Karina Aguirre Flores

Portada: Carlos Jacob Miranda Sánchez

Ilustraciones: Ilse Paulina Narváez Rosillo

Prohibida su reproducción total o parcial por cualquier medio de impresión o digital,
en forma idéntica, extractada o modificada, en castellano o en cualquier otro idioma,
sin autorización expresa o de la editorial.

Hecho en México

Dedicado a Alexandra, Ana Karen y Mildred



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

Claudia Susana Gómez López
Rectora General

Salvador Hernández Castro
Secretario General

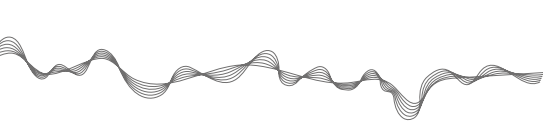
Diana del Consuelo Caldera González
Secretaria Académica

María del Pilar González Muñoz
Directora de Apoyo a la Investigación y al Posgrado

ÍNDICE

Presentación	9
Prólogo	13
1. El origen de todo	15
2. ¿Existen los puntos?	21
3. ¿Qué sabemos de lo más pequeño?	30
4. ¿Qué sabemos de lo más grande?	45
5. ¿Qué no entendemos?	62
6. Del punto a las cuerdas	74
7. De supercuerdas y dimensiones extra	83
8. Más que solo cuerdas	93
9. Un universo de cuerdas	110
10. El paisaje y el pantano	122
11. Epílogo: ¿es la teoría de cuerdas una teoría real?	127
A. Apéndice 1: ¿Por qué 10 dimensiones?	130
B. Apéndice 2: Teoría de cuerdas en México	132
C. Bibliografía recomendada	135



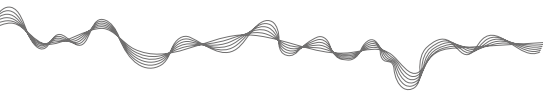


PRESENTACIÓN

Con el libro que tiene el lector en sus manos da inicio el proyecto editorial del programa institucional de divulgación y comunicación de la ciencia *eUGreka: tu conecte con la ciencia* de la Universidad de Guanajuato. Este programa responde a la necesidad cada vez más sentida de generar productos que mantengan informada a nuestra sociedad acerca de los acelerados avances en ciencia y tecnología, en un ejercicio de educación continua masivo que permita discriminar información genuina, proveniente de los centros de generación del conocimiento, de la abrumadora cantidad de información que se genera de manera cotidiana en nuestra hiperconectada sociedad.

El programa ha generado una actividad de comunicación muy diversa con características muy definidas: *todos los temas, todos los actores, todos los medios*. En este contexto, hasta hoy se han publicado más de trescientos artículos de divulgación en periódicos; producido cerca de doscientos programas de radio, que en su actual etapa se han enfocado al público infantil; se han generado cientos de productos audiovisuales, podcasts de ciencia, artículos de divulgación en la revista *Jóvenes en la Ciencia* y decenas de festivales de ciencia en las comunidades del estado de Guanajuato, entre otros.

La deuda del programa era la producción editorial, que hemos dejado para esta etapa; la razón es simple, no teníamos un sistema profesionalizado para la comunicación de la ciencia y había que identificar sobre la marcha a los miembros de nuestra comunidad universitaria con el talento para la comunicación escrita y la disposición de generar textos de largo alcance que pudieran constituir el punto de partida



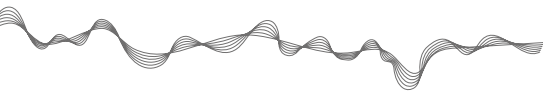
para la colección de libros de comunicación de la ciencia del programa *eUGreka: tu conecte con la ciencia*.

Este es el primer volumen de esta colección, para el que hemos seleccionado una temática que nos apasiona a todos. El universo en que vivimos ha sido tema de observación, análisis, reflexión y fuente de inspiración desde tiempos inmemoriales. La observación de los astros y su movimiento fue una constante en las culturas antiguas, por la curiosidad natural del ser humano, pero también porque de ella se obtuvieron patrones de comportamiento regulares de la naturaleza cuyo entendimiento paulatinamente representó ventajas para la supervivencia de las sociedades antiguas.

La evolución de nuestra sociedad (nuestras sociedades) ha permitido transitar de estas observaciones primarias a tener actualmente una comprensión robusta de cómo es y ha sido nuestro universo, en una perspectiva que parte de su estructura actual y se extiende hacia el pasado, hasta los tiempos en los que, según lo indican observaciones diversas y precisas, todo lo que existe en nuestro universo estaba concentrado en un espacio muy reducido. Esta comprensión se asienta en dos pilares: el modelo estándar de las partículas elementales y la relatividad general.

El primero constituye el logro conceptual más impresionante de la humanidad y describe a nivel cuántico tres de las cuatro interacciones fundamentales de la naturaleza hasta hoy descubiertas: la interacción electromagnética, la interacción débil y la interacción fuerte. Su construcción ha sido una empresa formidable de un gran número de personas que han trabajado en miles de experimentos y en la sistematización de la información obtenida hasta lograr la síntesis en una descripción simple, formalmente consistente, de estas interacciones, basada en el formalismo de la teoría cuántica de campos con un principio de norma.

La relatividad general describe la interacción gravitacional a nivel clásico y bajo suposiciones razonables sobre las propiedades del universo a gran escala, permite inferir su

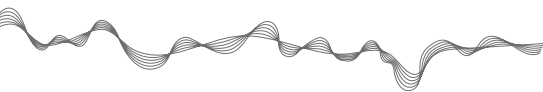


comportamiento en tiempos pasados y entender la expansión acelerada que, de acuerdo a observaciones experimentales, está teniendo. Si reversionamos en el tiempo esta descripción, encontraremos las diferentes etapas por las que ha pasado nuestro universo hasta llegar a tiempos en que su tamaño era muy pequeño y sus propiedades estuvieron dictadas por las interacciones descritas por el modelo estándar de las partículas elementales.

El fascinante campo de la cosmología abarca de estos dos pilares y resulta que entender el comportamiento de la naturaleza, desde los fenómenos cotidianos hasta llegar a lo que hoy día consideramos como partículas elementales; no solo proporciona información del comportamiento de la naturaleza a distancias tan pequeñas como la millonésima parte de la millonésima parte de la millonésima parte de un centímetro, sino que además, cuando lo juntamos con la plétora de resultados de las observaciones astrofísicas de las últimas décadas, permite también tener una idea clara de lo que fue nuestro universo hace del orden de trece mil setecientos millones de años.

Entender más allá, requiere explorar la naturaleza a distancia más pequeñas o equivalentemente a energías más grandes que lleve a resolver los misterios que presenta el modelo estándar, su regularidad, la amplia distribución de valores de las masas de las partículas elementales y los fenómenos que no encuentran explicación en este formalismo, como la generación de mecanismos para la desaparición de la antimateria, entre otros. *Un universo de cuerdas* es una de las más ambiciosas y extremas propuestas para la física más allá del modelo estándar que incluye la posibilidad de una teoría cuántica de la interacción gravitacional.

Entender técnicamente el modelo estándar, la relatividad general, así como las complejidades de la teoría de cuerdas, requiere largos años de entrenamiento sistemático y consistente. La descripción del comportamiento de la naturaleza requiere de un lenguaje formal, diversas ramas de



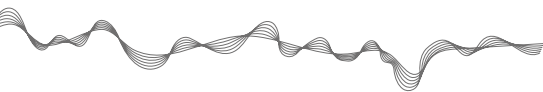
las matemáticas, el experto se acostumbra eventualmente a este lenguaje y la evolución de su propia comprensión está basado cada vez más en su dominio. Por ello, explicar en términos coloquiales los resultados del trabajo de investigación en estas áreas del conocimiento es todo un desafío.

El presente libro logra remontar este desafío con creces. En un lenguaje simple, sin una sola ecuación, Óscar Loaiza Brito, quien se dedica al estudio formal de la teoría de cuerdas, hace un recorrido por los conceptos más importantes que dieron origen al modelo estándar de las partículas elementales, a la relatividad general y la aplicación de ambas a la evolución del universo, la cosmología; para desembocar en la posible descripción de las interacciones de las partículas y sus propiedades como excitaciones de cuerdas, que en esta posibilidad serían los componentes últimos de la materia y su cuantización consistente conllevaría la respuesta a la cuantización de la interacción gravitacional y a las actuales preguntas de esta disciplina y de la física de las partículas elementales, permitiendo así asomarnos a tiempos más lejanos en la historia de nuestro universo.

¿Un universo de cuerdas? Puede ser, el estilo del autor permite adentrarnos en esta posibilidad con un texto ágil y de amena lectura donde claramente separa lo que conocemos bien por los resultados de miles de experimentos, de lo que la imaginación nos lleva a concebir como la posibilidad última para la estructura de la naturaleza, sus desafíos y su estado del arte. Disfrútenlo.

Dr. Mauro Napsuciale

Director de Apoyo a la Investigación y al Posgrado
Guanajuato, octubre 2022



PRÓLOGO

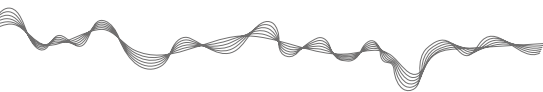
En 1986 tuve la fortuna de leer un libro maravilloso, *Un universo en expansión* de Luis Felipe Rodríguez, que a mis 12 años me hizo saber que podía dedicarme a estudiar el universo. El libro fue el primero de una serie que pronto se convertiría en referente de la divulgación de la ciencia en México, llamada La ciencia para todos.

A partir de entonces me he convencido que una parte fundamental del quehacer científico involucra la divulgación del conocimiento. Ello no solo permite a la sociedad ser partícipe de los descubrimientos en diversas áreas de la ciencia, sino a valorar el conocimiento como medio de satisfacción personal. No podemos seguir impulsando a la riqueza material como único baluarte de superación.

Para quienes nos dedicamos a la investigación científica es muy importante retribuir a la sociedad, de alguna forma, lo que en nosotros ha invertido. Transmitir lo aprendido en nuestras investigaciones es una forma de compartir satisfacciones y que mejor si con ello podemos motivar a jóvenes y no tan jóvenes lectores a tener un pensamiento científico, e incorporar a la ciencia a sus vidas.

Este pequeño libro trata sobre la teoría de cuerdas, área en la que concentro mi investigación. Está dirigido principalmente a lectores que no tengan conocimientos previos de ella, por lo que estudiantes de secundaria o preparatoria no tendrán problema en seguir la mayoría de las ideas expuestas.

A diferencia de otros países, el grupo de investigadores trabajando en teoría de cuerdas en México es aún pequeño. La idea de escribir este libro obedece también a la esperanza de



motivar a muchos de nuestros jóvenes estudiantes a elegir una carrera científica, quizá en física, quizá en teoría de cuerdas.

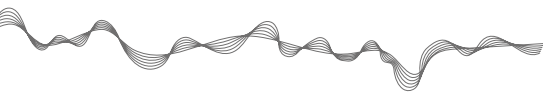
Espero que el lector encuentre una lectura amena que al final le haga pensar, cuestionar y preguntarse muchas cosas acerca de la naturaleza del universo en el que vivimos.

Quiero agradecer a quienes hicieron posible la culminación de este proyecto. A Artemisa Helguera Arellano, jefa del departamento de Comunicación y Divulgación de la Ciencia de la Dirección de Apoyo a la investigación y al Posgrado, DAIP de la Universidad de Guanajuato por su apoyo, gestión y comprensión.

A mis amigos y colegas, Juan Barranco, Argelia Bernal, Nana Cabo, Francisco Narciso Chin, César Damián, Alberto Diez, Hugo García Compeán, Alma González, Editha Lemke, Gabriela López, Gustavo Niz, Octavio Obregón, Alejandro Ortiz, Miguel Sabido, Saúl Ramos-Sánchez, José Socorro, Luis Ureña e Ivonne Zavala de quienes siempre aprendo algo por pequeñas que sean las charlas. A mis padres y hermanos por su apoyo y motivación.

Finalmente agradezco a mi familia, Alexandra, Ana Karen y Mildred, por su constante apoyo, motivación y paciencia; por las risas, las diversiones, los enojos y los llantos. Por ser la razón que da sentido a la vida de un existencialista y ser los pilares de mi vida. Las amo.





1. EL ORIGEN DE TODO

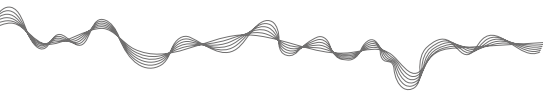
“...¿quién ha de llevar la carga?, ¿quién tomará sobre sí mismo el peso de ser el sol y traer el amanecer?”

Javier Tapia, *Mitología Azteca*

Al observar los millares de estrellas en el cielo nocturno, estamos en realidad viendo cómo eran en el pasado. Cada objeto que vemos o detectamos ya no existe tal como lo percibimos. Pero la luz de cada uno de ellos contribuye a una historia que podemos y deseamos descifrar porque somos parte de ella: la historia del universo.

Si la historia del universo estuviera escrita en un libro, al día de hoy solo tendríamos algunos fragmentos, algunas páginas de él, que habríamos obtenido cada vez que miramos el cielo, cada vez que nos preguntamos algo y cada vez que podemos explicarlo. Con esas pocas o muchas páginas que podamos conseguir, al igual que en un rompecabezas, creemos que podemos reconstruir el libro completo y entonces deducir cómo es el universo ahora, cómo fue en el pasado y cómo será en el futuro.

Comprender por qué el universo es cómo es, es aún una pregunta sin respuesta, pues a pesar de que hay muchas cosas que sabemos, aún hay muchas otras que no. ¿Cómo es que llegamos a saber esas “muchas cosas” por solo observar luces y partículas?



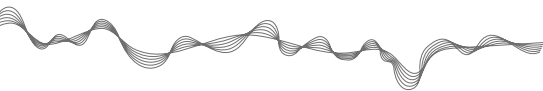
El primer paso hacia el conocimiento es la valoración de nuestra curiosidad. Para saber lo que ahora sabemos fue necesario que la humanidad aprendiera a leer las luces del cielo, algo que solo pudo suceder debido a la existencia de personas que en algún momento de su vida les intrigó saber qué pasaba más allá de nuestros cielos, personas que quisieron saber qué son esas luces en la noche, saber de dónde proviene todo y cómo es que llegamos aquí. Esas personas dedicaron su vida a dar explicaciones, a responder preguntas, en concreto, a ser curiosas.

La curiosidad es parte de nuestra humanidad y en muchas ocasiones se manifiesta por primera vez en nuestra infancia. Así, vemos que son las niñas y los niños quienes generalmente hacen las preguntas más interesantes: ¿por qué la luna me sigue?, ¿por qué la noche es oscura?, ¿por qué el sol quema? Son preguntas relevantes porque su respuesta requiere de una comprensión de la naturaleza a un nivel muy profundo.

A veces los padres consideran estas preguntas como “irrelevantes” (quizá por miedo a reconocer que no saben cómo responder) y desmotivan a sus hijas e hijos a buscar y encontrar respuestas. Pero muchos otros, a lo largo de la historia de la humanidad, han impulsado esa curiosidad. Como resultado, han existido y existen mujeres y hombres de ciencia que han elaborado y elaboran teorías bastante completas sobre cómo funciona la naturaleza en sus múltiples facetas. Gracias a ellas, a ellos, tenemos tecnología, medicinas, mejores alimentos, medios de transporte, de comunicación y una muy buena noción sobre la naturaleza del universo.

¿Cómo hemos llegado a este conocimiento? ¿Cómo estamos seguros de lo que sabemos? ¿Cómo es que eso que hoy entendemos sobre el funcionamiento de la naturaleza, es mejor que la manera en la que nuestros ancestros entendían su mundo hace miles de años? ¿en qué sentido es mejor?

No es de extrañar que las primeras explicaciones en la historia de la humanidad recurrieran a la magia y a la suposición de la existencia de seres divinos capaces de



controlar los diferentes fenómenos que se observaban. Sin embargo, la necesidad de explicarlos no se limitó a una o pocas civilizaciones. Las muy diversas mitologías de las culturas a lo largo del tiempo muestran algo en común: la necesidad que tiene el humano por conocer su origen, el de su mundo y el del universo.

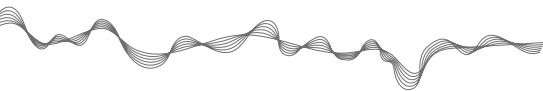
Por ejemplo, para la cultura nahua, conformada por varias civilizaciones de Mesoamérica como los olmecas, chichimecas, toltecas, mexicas y tenochcas, (estos últimos conocidos como aztecas) había diversos cielos habitados por los dioses, de acuerdo a su jerarquía. En el de más alto nivel, el décimo tercero, vivía Ometecuhtli “el señor doble que nadie ha visto ni conoce”, el dios creador del universo.

Los nahuas creían que la creación era el resultado natural de la interacción de posturas opuestas. Confrontar puntos de vista, ideas, sueños y metas diferentes, era para los nahuas el camino directo para construir algo nuevo. Es por ello que Ometecuhtli poseía una dualidad innata que le permitía crear cosas, entre ellas, nada menos que el universo en su totalidad.

La creación del universo nahua se remonta a una leyenda, en la que Ometecuhtli, usando su dualidad, formó de sí mismo a una pareja de dioses, Tonacatecuhtli y Tonacacahuatl, para que se unieran y crearan al mundo. Tuvieron cuatro hijos: Xipetotec, Tezcatlipoca, Quetzalcóatl y Huitzilopchtli. Al no poder tener hijos, los cuatro dioses decidieron crear humanos que se reprodujeran y que les rindieran tributos.

Junto con un grupo extenso de dioses y semidioses, cada uno de ellos tuvo su influencia en la creación de un mundo en donde los humanos habitaban. Sin embargo, los primeros cuatro intentos, llamados “soles”, acabaron en desgracia con la extinción de la humanidad. Es en el quinto sol, guiados por Huitzilopochtli, cuando se funda la ciudad de Tenochtitlán y el imperio mexica llega a su cumbre.

La razón de los aparentes fracasos y éxitos en los primeros cuatro intentos, se debió en gran parte a la confrontación entre Tezcatlipoca y Quetzalcóatl, quienes poseían actitudes



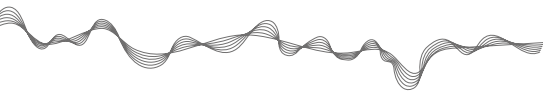
y posturas muy opuestas. A grandes rasgos, al primero se le relacionaba con situaciones oscuras, malvadas y viles, era un dios envidioso; mientras que al segundo se le atribuían actitudes de serenidad y esperanza. Eran manifestaciones opuestas de la dualidad inicial que, sin embargo, necesitó de su unión para la creación del quinto sol.

La mitología nahua es compleja, mucho más que lo que aquí se ha expuesto, pero no deja de ser interesante que en la concepción de su universo se haya hecho uso de dualidades, de relaciones intrincadas y de aparentes inconsistencias. Si le preguntamos a alguien que no haya estudiado física, seguramente atribuirá las mismas características a nuestras teorías actuales.

¿En qué difieren estas dos visiones? ¿Cómo sabemos que las explicaciones modernas no son igualmente atributos fantásticos como en las muchas mitologías que han aparecido en la historia de la humanidad y cuya única diferencia sean los nombres que les otorgamos? ¿Por qué es mejor decir que el espacio-tiempo se curva y no decir que Tezcatlipoca controla el movimiento de los astros?

Resulta que la curiosidad que experimentamos por saber los “cómo” y los “por qué” de todo lo que nos rodea nos ha impulsado no solo al límite de nuestra imaginación y creatividad, sino a saber cuándo la explicación que construimos es cierta o cercanamente fiable para explicar alguna faceta del universo en el que vivimos. Hemos desarrollado una manera confiable de saber cuándo nuestras explicaciones son útiles. Esto es lo que llamamos ciencia. La ciencia no solo consiste en dar explicaciones, sino que estas deben verificarse, deben tener consecuencias y predicciones y en muchos casos han tenido aplicaciones que han mejorado substancialmente la calidad de nuestras vidas.

Al día de hoy, primer cuarto del siglo XXI, comprendemos bastante bien cómo funciona el universo a escalas muy grandes (comparadas con nuestro tamaño). Esto significa que podemos reproducir lo que observamos y hacer predicciones

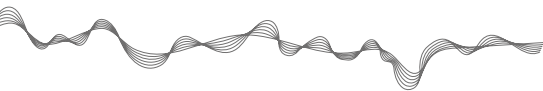


de lo que aún no vemos. Con este conocimiento, podemos entender parte de la evolución del universo e incluso determinar nuestra posición (casi) exacta en la Tierra, por medio del sistema GPS (Sistema de Posicionamiento Global). Esto se logra por el conocimiento que tenemos de la fuerza de gravedad a través de la teoría general de la relatividad de Albert Einstein, propuesta en 1915 y verificada cientos de veces en los años subsecuentes.

También tenemos una muy buena idea de cómo se comportan las cosas a escalas muy pequeñas. Es la llamada teoría cuántica de campos que, a diferencia de la teoría de la relatividad general, no fue concebida por una sola persona sino que fue construida por varias mujeres y hombres de ciencia entre 1900 y 1970. Con la teoría cuántica podemos explicar el comportamiento del átomo y cómo es que está constituido por objetos aún más pequeños a los que hemos llamado partículas fundamentales, así como la naturaleza de las otras tres fuerzas que conocemos: la electromagnética y las nucleares débil y fuerte.

Con ambas, la teoría de gravedad y la teoría cuántica de campos, podemos explicar la dinámica de nuestro universo, aunque solo en condiciones que no las involucran simultáneamente: usamos la teoría cuántica de campos cuando lo muy pequeño no interactúa con una gravedad intensa y usamos la teoría de la relatividad general para describir la dinámica de la materia y energía a escalas que ignoran su comportamiento cuántico. Para escenarios en donde debemos considerar fuerzas de gravedad muy intensas y a escalas muy pequeñas, no sabemos cuál es la teoría correcta o, en otras palabras, no sabemos cómo se comporta el universo a nivel cuántico. El problema es que la relatividad general y la teoría cuántica de campos son incompatibles. Lo que para una es un hecho, para la otra es un absurdo.

Así como Tezcatlipoca y Quetzalcóatl son opuestos en muchos sentidos, pero es necesaria su unión para la creación de un mundo habitable; los dos pilares de la física teórica son necesarios para responder dudas fundamentales



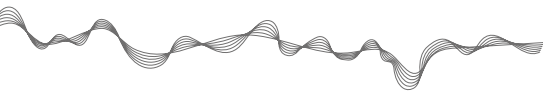
que tenemos acerca de cómo es el universo y por qué es así; pero ellos son diametralmente opuestos y necesitamos formular una teoría en donde se reconcilien, sobre todo para poder explicar fenómenos que involucran la presencia de fuerzas de gravedad no despreciables en ambientes microscópicos. Estos suceden, por ejemplo, en la cercanía de los hoyos negros, en su interior y en las etapas tempranas del universo, cuando toda la materia y energía que actualmente observamos estaba concentrada en una región más pequeña que el tamaño de un átomo.

Comprender la manera en que la gravedad se comporta a nivel cuántico es una necesidad. Sin ella no podemos dar coherencia al universo en que vivimos. Debe haber (creemos que) una manera de reconciliar las dos teorías más exitosas que tenemos y nuestro objetivo es construir una teoría que lo haga.

En términos de la mitología azteca, buscamos a Ometécotl (la teoría dual completa), aunque se esconda en el cielo más lejano. Tenemos a sus cuatro hijos (cuatro fuerzas) para rastrearlo y aprovecharemos las circunstancias en que sus dos hijos más distantes, Quetzalcóatl y Tezcatlipoca (Gravedad y Cuántica), necesiten unirse para poder crear un mundo habitable (comprensible).

Para ello trataremos de convencer al lector que es necesario apartarnos de ciertas suposiciones que consciente o inconscientemente hemos construido acerca de los objetos fundamentales que constituyen el universo en su totalidad: dejaremos a un lado la noción ampliamente arraigada del objeto puntual como el bloque fundamental de la interacción de la materia para permitir que ahora lo sea un objeto extendido: una cuerda.

Este es el modelo al que llamamos teoría de cuerdas. Aún no tenemos evidencia de que sea real, pero su estructura lógica y las respuestas que puede ofrecer, hacen de él un modelo de gran interés en la comunidad científica. El objetivo de este libro es adentrarnos en los detalles del modelo y ofrecer un panorama de las posibilidades que brinda. ¡Bienvenido a un universo de cuerdas!



2. ¿EXISTEN LOS PUNTOS?

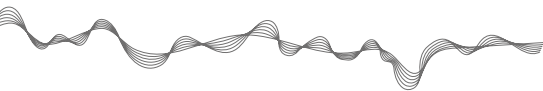
“...no puedes cortar la cáscara de una naranja en partes más finas que sus átomos...”

Richard Feynman

Comencemos nuestro viaje planteando una pregunta muy simple: ¿de qué están hechas las cosas? Podría parecer una pregunta tonta, pero llegar a una respuesta convincente no es algo sencillo; precisamente, la dificultad de responderla hace que la pregunta sea relevante, pues pone a prueba lo que sabemos acerca de la naturaleza y la manera en que se comporta el universo en el que vivimos.

La búsqueda de respuestas a esta pregunta no se hace con el propósito de obtener algo útil, sino por simple curiosidad. El hecho es que esa curiosidad resultó tremendamente útil a la humanidad. El saber de qué están hechas las cosas nos ha permitido gozar de mucho de lo que tenemos como sociedad moderna. ¿Por qué es importante saberlo?, ¿son las posibles respuestas meras especulaciones?, ¿nos sirven de algo?

Si logramos encontrar los objetos fundamentales de los que están hechas todas las cosas, quizá podamos responder otras preguntas y entender fenómenos que damos por hechos y que por lo mismo creemos entender cuando



quizá no sea así. Por lo tanto, lo primero que debemos discutir es qué entendemos por objetos fundamentales.

En una noción simplista, un objeto fundamental es aquel que no puede ser dividido en partes aún más pequeñas y que en conjunto pueden dar forma a todas las cosas que observamos. Es el concepto central en una visión predominantemente reduccionista¹.

Para saber qué buscamos, pensemos en términos de dibujos, de geometría simple, tal como nos enseñaron en la escuela primaria. Nuestro primer objetivo es dibujar un cubo. ¿Cómo lo hacemos? Basta dibujar dos cuadrados en diferentes lugares, pero de forma paralela y unir los vértices correspondientes de ambos cuadrados (no es un cubo en realidad pues lo dibujamos en una superficie de solo dos dimensiones). Así que, si sabemos cómo dibujar un cuadrado, dibujar un cubo no es nada difícil. Pero dibujar un cuadrado es aún más fácil, pues basta saber dibujar cuatro rectas y unir las adecuadamente (ver figura 1).

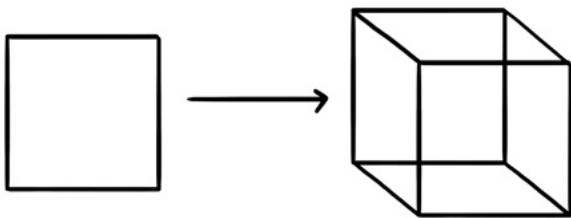
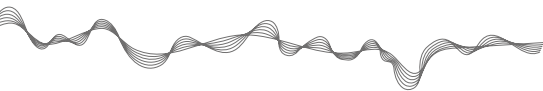


Figura 1. Podemos construir un cubo trazando líneas desde los vértices de un cuadrado y en dirección perpendicular a su plano.

¿Y cómo dibujamos una línea recta? Al parecer, esto es lo más sencillo de todo, pero si pensamos un poco con cuidado es al mismo tiempo lo más intrigante, pues así como el cubo está formado por cuadrados y estos por rectas, podemos pensar en una recta como la unión de una cantidad infinita de puntos.

¹ A grandes rasgos, el Reduccionismo es una postura filosófica que se basa en la adquisición de conocimiento de un objeto a través de la reducción a sus partes más simples.



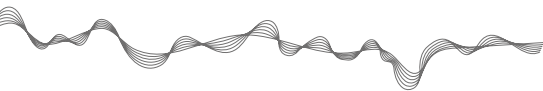
¿Cómo podemos dibujar una infinidad de puntos? Podemos dibujar muchísimos puntos, todos ellos alineados, alejarnos de nuestro dibujo varios metros y ver que en efecto eso parece una línea; pero sabemos muy bien que lo que en realidad dibujamos es muy diferente a una línea en la que en ningún momento separamos el lápiz del papel. Una línea no es una serie finita de puntos, aunque desde muy lejos parezca que sí.

Si llevamos esta misma idea y nos detenemos a pensar un poco, veremos que no tenemos certeza de que los puntos existan realmente en la naturaleza, en el mundo real. ¿Por qué deberían las matemáticas, en este caso la geometría, tener una relación con lo que observamos en nuestro entorno?

Matemáticamente puede ser sencillo definir un punto, pero ¿existe el punto en el mundo real? Después de todo, si matemáticamente el punto es la base para poder construir todo lo demás, es natural adjudicar una existencia puntual a las partículas fundamentales que queremos buscar, pues estas, al igual que el punto, son la base para la existencia de cada objeto que a diario observamos, desde el grano de arena hasta las grandes galaxias en el universo.

Contar con un número infinito de partículas elementales que conformen todo lo que vemos parece extraño. La otra opción es que, al igual que dibujar una serie finita de puntos, los objetos con los que convivimos día a día en realidad estén formados por un número finito de partículas elementales, pero que sean tan pequeñas que no seamos capaces de distinguir cada una de ellas por separado y solo las percibamos como si en conjunto fueran continuas. Es como ver una pared formada de ladrillos, tan lejos, que no seamos capaces de distinguir dónde termina o empieza cada ladrillo.

Una tercera opción es que aceptemos que en la naturaleza no existen los puntos, pero las líneas sí. En este caso, los objetos fundamentales serían objetos extendidos de una dimensión, líneas o cuerdas (sí, las mismas cuerdas de las que hablaremos más tarde). Sin embargo, el problema persiste pues ahora podemos preguntarnos sobre cuál es el ancho de una línea. La definición matemática es que no tiene anchura,



es infinitamente delgada. Al igual que en el caso del punto, tenemos tres opciones: tenemos una infinidad de líneas que unidas forman objetos tridimensionales, se requiere un número finito de líneas para conformar lo que vemos o los objetos fundamentales no son cuerdas sino objetos bidimensionales como las membranas.

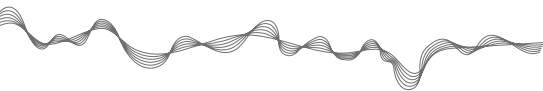
El argumento por supuesto se repite para este último caso, hasta llegar a la última opción en la que los objetos fundamentales sean tridimensionales. Pero entonces una última pregunta nos puede surgir: ¿qué hace que el universo sea tridimensional?

A pesar de todas las posibilidades que hemos planteado sobre la naturaleza de las cosas, la manera de saber cuál es la respuesta correcta es a través de la ciencia. Históricamente se trata de un juego entre razonamientos, juegos mentales, matemática y experimentación. Pero nosotros continuaremos haciendo uso solo de nuestra imaginación por lo que a partir de ahora haremos experimentos en nuestra mente.

Comencemos tomando una hoja de papel y preguntémonos si se trata de un objeto bidimensional o tridimensional. Una hoja de papel tiene una anchura. Sí, es muy pequeña, pero no es cero, así que no es una superficie en el sentido matemático de la palabra.

Pensemos que podemos rebanar más finamente a la hoja de papel hasta obtener una hoja cuyo grosor esté hecho por puntos, asociados de alguna manera con el papel (los llamaremos “puntos de papel”). Estos puntos representarían los objetos de los que está hecho el papel. Si lográramos observar esos puntos, podríamos decir que en efecto, existen puntos, líneas y superficies en la naturaleza.

Veamos si es posible hacerlo. Si dividimos una y otra vez una hoja de papel, llegará un momento en que será imposible hacer más cortes sin que destruyamos su esencia. Habremos llegado hasta el objeto más pequeño del cual está hecho el papel y dista mucho de ser un punto. Se trata de una molécula, que aunque muy pequeña para los tamaños a los que estamos



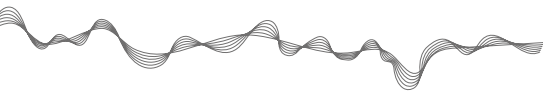
acostumbrados en la vida diaria, posee un volumen diferente de cero (una molécula de papel mide aproximadamente una millonésima de milímetro, esto es, que necesitamos apilar un millón de moléculas para tener un milímetro de papel).

Podemos tratar de dividir a la molécula y encontrar los puntos de los que está hecha. Eso implica que la existencia de los “puntos de papel” ha quedado descartada, pero aún podemos suponer que existen objetos en la naturaleza, como las mismas moléculas, que están formadas por puntos, objetos más fundamentales y comunes a todos los objetos. Diversas combinaciones darían lugar a muchas diferentes moléculas. Así que ahora buscamos una herramienta de corte más refinada, y comenzamos a dividir a las moléculas.

Pronto nos damos cuenta que las moléculas tampoco están formadas de puntos, sino de unos objetos que llamamos átomos, y que aunque mucho más pequeños que las moléculas (un átomo mide aproximadamente una décima parte de una molécula, es decir, una diezmillonésima parte de un milímetro), tienen un volumen diferente de cero, es decir, no son puntos.

Insatisfechos por no haber encontrado lo que buscamos, hacemos una pausa, lo que nos permite admirar lo que hemos aprendido. Ahora sabemos que las cosas están hechas de moléculas, y que estas a su vez están formadas de átomos. Un poco más de curiosidad nos llevará a la sorprendente conclusión de que no hay un número gigantesco de átomos diferentes. Muchas de las cosas con las que estamos familiarizados están hechas de muchísimas copias de no más de 100 diferentes átomos (y sus correspondientes isótopos). Pero 100 diferentes elementos básicos como los átomos nos dicen de cierta manera que no son tan elementales como desearíamos. Algo básico, creemos, debería ser algo de lo que todo esté hecho, o casi todo. Quizá uno o cinco o diez elementos básicos serían aceptables, ¿pero 100?

No nos dejemos distraer y continuemos nuestra búsqueda. El siguiente objetivo es cortar los átomos y ver de qué están hechos. Probablemente tengamos suerte esta vez y



encontremos que los átomos están hechos de puntos y el hecho de que el átomo tenga un volumen se deba solo a que esos diferentes puntos ocupan lugares diferentes debido a diferentes propiedades intrínsecas que los definen. ¿Será así?

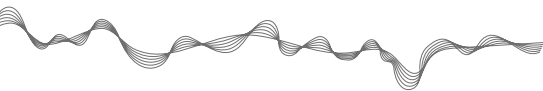
Al penetrar en el interior del átomo observamos que está formado por tres objetos diferentes y lo mejor de todo, ¡es que se comportan como si fueran realmente puntos! Esto significa que no hay manera de que midamos que tienen un volumen, que no importa la herramienta que usemos, aún la más energética, son infinitamente pequeños, al menos hasta donde la tecnología nos permite. Pero recordemos que esa tecnología sigue avanzando.

Hemos encontrado felizmente que, al parecer, todas las cosas están formadas por objetos puntuales. La felicidad es tan grande, y los objetos tan importantes, que merecen recibir un nombre que los distinga. Les llamaremos electrones, protones y neutrones².

La razón de los nombres no debe interesar por el momento (aunque nos dicen que no todos los puntos son necesariamente iguales). Ellos son la base de la existencia de las cosas e indican que es posible que en la naturaleza sí existan los puntos, y que no solo se trata de una abstracción matemática producto de una mente inquieta. Más aún, esta serie de ideas nos coloca en una nueva y fascinante vertiente: la extrapolación de ideas matemáticas parece tener conexión con los fenómenos que observamos, o como muchos científicos han dicho, parece que las matemáticas son el lenguaje a través del cual podemos estudiar, comprender y describir a la naturaleza, este referida a la estructura del átomo o a todo el universo.

Sin embargo, esa misma mente inquieta nos lanza otra pregunta: ¿cómo sabemos que algo que parece un punto es en realidad un punto? Si nos hiciéramos esa pregunta en

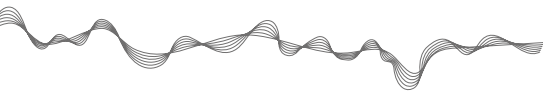
² El electrón fue descubierto por Joseph John Thompson y su equipo en 1896, mientras que el protón fue descubierto en 1918 por Ernest Rutherford quien a su vez propuso la existencia del neutrón, el cual no fue observado sino hasta 1938 por James Chadwick.



una noche clara y despejada, la respuesta podría borrarla la felicidad de haber encontrado electrones, protones y neutrones. Por ejemplo, las estrellas en el cielo nocturno son aparentemente claros ejemplos de objetos puntuales. No podemos a simple vista atribuirle un área a una estrella. No somos capaces de observar que en realidad se tratan de objetos mucho más grandes que nuestro planeta y no de puntos en el estricto sentido matemático.

Así que la afirmación de haber llegado a la división final en la que todo está hecho de puntos, bien puede deberse a que no tenemos los medios para seguir dividiendo a los electrones, protones y neutrones. Debemos buscar indicios que nos digan que aún podemos dividirlos más o, por el contrario, que hemos llegado al final de la búsqueda. Hay al menos dos maneras de hacer esto: la primera es idear experimentos en donde se trate de dividir a estas partículas. Es como tratar de cortar un grano de sal con un serrucho, así que debemos refinar el serrucho y crear un objeto más preciso y filoso. Lo mismo sucede con estos experimentos. Se requieren de máquinas muy precisas y refinadas. La segunda opción es buscar indicios que nos lleven a concluir que ese objeto que pensamos que es un punto, no puede serlo por alguna razón.

Volvamos de nuevo al caso de las estrellas. ¿Por qué concluimos que no se tratan de puntos en el cielo? ¿cómo sabemos eso? Si vemos a una estrella a través de un telescopio convencional seguiremos viendo un punto luminoso. Pero si pasamos esa luz por un prisma, veremos que se forma una especie de arco iris local, al que los científicos llaman espectro. Pero aquí no importan los nombres, sino los hechos, este pequeño arco iris contiene líneas oscuras, que por experimentos realizados en laboratorios, sabemos que son debidas a que la estrella contiene millones de átomos diferentes. Por lo tanto, las estrellas deben tener una enorme cantidad de átomos y deben ser más grandes que un punto. Mediante otros resultados, también sabemos que son muy grandes y que la razón de que parezcan puntuales es porque se encuentran muy lejos de nosotros.



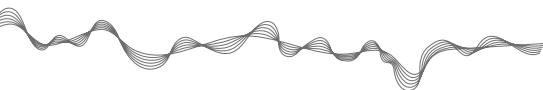
De la misma manera se buscó si los electrones, protones y neutrones no eran puntuales o fundamentales, como dicen los físicos, y que en realidad estuvieran formados por otros objetos más pequeños. Si resultaba que no, podríamos pensar que habríamos llegado al final de la búsqueda. El resultado fue que dos de esos aparentes puntos (protones y neutrones) están formados, cada uno de ellos, por otros dos puntos a los que llamamos quark-up y quark-down. Nuevamente los nombres no importan por el momento, más que el hecho de saber que podemos distinguir entre esos dos nuevos puntos³. Para el caso del electrón, no se encontró que estuviese formado por más objetos, así que para todo propósito el electrón es una partícula puntual.

En resumen, sabemos que todos los objetos que observamos están formados de átomos, los cuales a su vez están constituidos por electrones, protones y neutrones. Estos dos últimos son el resultado de la unión de dos diferentes tipos de quarks (y muchísimas partículas virtuales que se crean entre ellos), al menos hasta lo que los experimentos nos dejan ver (ver figura 2). A esto le llamamos la escala de energía: si las cosas que buscamos son muy pequeñas, necesitamos mucha energía para poder concentrar nuestra búsqueda en esos tamaños. Así que hablaremos indistintamente acerca de cosas microscópicas o altas energías, o análogamente, sobre cosas macroscópicas o bajas energías.

En este caso, al menos hasta las escalas de energía que nuestra tecnología nos ha permitido llegar, parece que podemos decir con confianza que en la naturaleza los objetos puntuales existen y que aquella abstracción matemática que nos enseñan en la escuela puede tener una realidad palpable.

Sin embargo, hay un problema en esta búsqueda del punto. Nuestra curiosidad nos ha enseñado que la existencia del punto ha sido descartada una y otra vez a medida que

³ Los quarks fueron propuestos por Murray Gell-Mann (premio Nobel de Física de 1969) y Kazuhiko Nishijima en 1964. Su verificación experimental sucedió a través de una serie de experimentos entre 1967 y 1973 liderados por Richard Edward Taylor, Henry Way Kendall y Jerome Isaac Friedmann, ganadores del premio Nobel de Física del año 1990.



perfeccionamos los métodos de medición. ¿Qué pasaría si en realidad los electrones y quarks no son realmente puntos, sino que solo lo parecen por el hecho de que no tenemos las herramientas necesarias para ir a energías más altas?

¿Si no podemos decir dónde está el punto con absoluta precisión, podemos decir que existe?

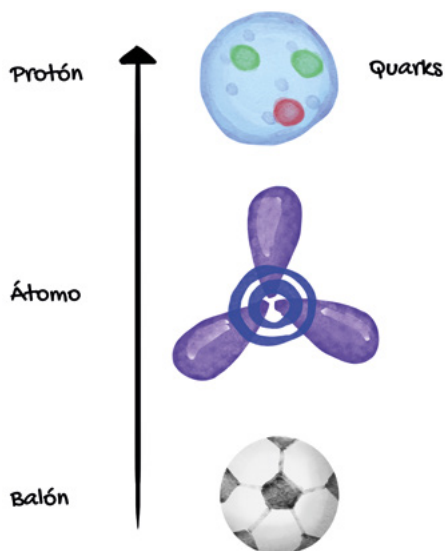
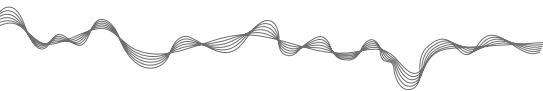


Figura 2. A medida que aumentamos la energía (flecha hacia arriba) podemos observar nuevas estructuras de la materia, como los átomos, los protones y los quarks.



3. ¿QUÉ SABEMOS DE LO MÁS PEQUEÑO?

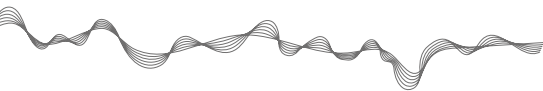
“¿Es el propósito de la física teórica ser no más que un catálogo de todas las cosas que pueden pasar cuando las partículas interactúan unas con otras y se separan? ¿O es tener un entendimiento a un nivel profundo en el que hay cosas que no son directamente observables pero que a través de las cuales tendremos una comprensión más fundamental?”

Julian Schwinger

Hasta ahora hemos limitado la búsqueda de los objetos fundamentales a las consecuencias de asumir que son puntuales. Pero las partículas que hemos encontrado, como los electrones y quarks, poseen otras características que influyen de manera importante en la forma en que se comportan. Con el objetivo de entender lo que pasa, hagamos nuevamente un viaje usando nuestra mente.

Imaginemos que tomamos un electrón, lo colocamos en la punta de un resorte y estiramos este último tanto como podamos para después soltarlo. La intuición nos dice que el electrón comenzará a moverse en un vaivén, hacia adelante y atrás, de tal manera que si no choca con otras partículas este movimiento seguirá eternamente. Al menos eso es lo que esperamos independientemente de si se trata de un electrón o de una pelota.

Pero el electrón tiene una propiedad muy importante, llamada carga eléctrica. La carga eléctrica no es sino una medida del trabajo y energía que nos cuesta, por ejemplo, acercar dos electrones (al menos en la escala de

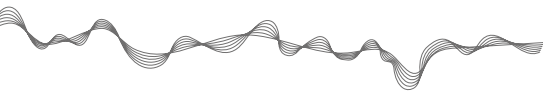


energía en la que estamos haciendo este experimento). Al continuar en su movimiento oscilatorio, hacia adelante y hacia atrás, veremos que a pesar de no interactuar con otras partículas, el electrón pierde energía y gradualmente disminuye su velocidad hasta cero. ¿A dónde se fue la energía de movimiento del electrón? Resulta que si ponemos otro electrón, que originalmente esté en reposo, a una distancia del primero (¿se puede?), el segundo electrón comenzará a ganar energía conforme el primero la pierde. Parece que la energía se ha transferido de un electrón al otro. ¿Cómo es esto posible?

La respuesta está en la teoría electromagnética cuya formulación completa se presentó a la comunidad científica en la segunda parte del siglo XIX⁴. Básicamente lo que sucede es que las cargas eléctricas crean un campo eléctrico que permea todo el espacio y que lleva la información de esa carga a cualquier otro punto. La velocidad con la que se transmite esa información es finita y puede calcularse. Además, una corriente eléctrica, que no es más que un flujo de cargas eléctricas constante, crea un campo magnético que también se propaga a cualquier punto del espacio. Para ambos campos, la distancia implica una disminución en sus efectos. Pero también se descubrió que al variar la magnitud de un campo eléctrico, se produce un campo magnético que también varía en el tiempo y viceversa. Es este hecho fundamental el que permite entender lo que sucede con una carga eléctrica acelerada.

Cuando el electrón se acelera por la fuerza proporcionada por el resorte, crea una corriente de carga eléctrica no homogénea que a su vez produce un campo magnético dependiente del tiempo. Este último, crea también un campo eléctrico dependiente del tiempo y el ciclo se repite alimentando la creación de campos eléctricos y magnéticos que viajan como una onda en el espacio que se propaga a la velocidad de la luz. Esos campos son los que transportan la energía cinética del electrón y cuando encuentran al segundo

⁴ Los fundamentos de la teoría electromagnética fueron presentados por Michael Faraday alrededor de 1832 y formulados de manera completa por James Clark Maxwell en 1865.



electrón le transfieren la energía, haciendo que se mueva como si estuviera anclado a un resorte invisible (por cierto, esto es en términos generales el principio de transmisión de señales electromagnéticas que nos permiten tener internet y hablar por teléfono celular).

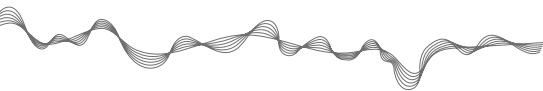
Aquí podemos aprender algo fundamental: la carga eléctrica está íntimamente relacionada con la luz, que es una onda electromagnética. Hablando en términos que nos serán más útiles, podemos decir que la materia que posee carga eléctrica interactúa con la luz. De aquí en adelante entenderemos por interacción, un intercambio de energía y de cantidad de movimiento.

¿Esta misma imagen funciona para el caso de un electrón real? Por electrón real me refiero aquí al electrón que constituye al átomo, no del que hemos imaginado pegado a un resorte (¿en dónde se pegaría? ¿en qué parte de la molécula de la aleación de elementos químicos de la que esté hecho el resorte?). En términos generales sí, pero hay que hacer algunas precisiones de suma importancia.

En el caso del electrón real que se acelera, la energía disipada está muy concentrada debido a que la fuente es una partícula a la que hemos adjudicado la propiedad de ser puntual y por lo que su energía es muy alta. Campos electromagnéticos con energías tan altas, requieren de una descripción más precisa que la dada por la teoría electromagnética. Una de esas precisiones implica que las ondas electromagnéticas se comportan como partículas⁵ cuya energía es proporcional a la frecuencia de las mismas. A dichas partículas se les denomina fotones.

De esta manera podemos decir que un fotón interactúa con un electrón cambiándole su velocidad y por lo tanto actuando como el mensajero de la fuerza eléctrica. ¿Podemos ver un electrón así en la naturaleza? Si, precisamente en un

⁵ Aunque el carácter corpuscular de la luz fue intuitivo por Isaac Newton y usado en la transferencia de energía entre las ondas electromagnéticas y los átomos por Planck en 1900, fue hasta la descripción del efecto fotoeléctrico por Albert Einstein en 1905 cuando se consideró seriamente tratar al campo electromagnético como una partícula.

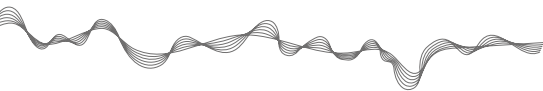


átomo. Un electrón se siente atraído a un protón y comienza a moverse de alguna manera alrededor de ese protón. Pero un movimiento de ese tipo implica un cambio en su velocidad y por lo que hemos dicho, debería llegar a detenerse y por lo tanto a unirse al protón al perder energía mientras emite fotones. Esto significa que el átomo, formado por un electrón y un protón, no debería existir y, por ende, ningún átomo en el universo y nosotros no estaríamos pensando en ello, pues no existiríamos. Evidentemente hay algo que no estamos comprendiendo, ¡puesto que aquí estamos!

El error fue asumir que los electrones se comportan como pelotas minúsculas con carga eléctrica. Hay algo más que se nos ha escapado y ese “algo más” es lo que da fundamento a la dinámica de lo más pequeño, llamada mecánica cuántica. Ahora sabemos que no es posible que un electrón esté completamente en reposo o con una velocidad precisa y al mismo tiempo sepamos en dónde está. Este es, a grandes rasgos, el llamado principio de incertidumbre de la mecánica cuántica, la rama de la física que precisamente se ocupa del estudio de la dinámica de partículas subatómicas.

Como un electrón no puede estar cerca de un protón, pues lo obligaría a detenerse (el protón es mucho más pesado que un electrón), entonces el electrón debe continuar moviéndose y así el átomo puede existir. En otras palabras, la idea de pensar en un electrón como un punto no es práctica ni útil, porque no podemos saber con absoluta precisión su velocidad y posición de manera simultánea. Lo más que podemos visualizar es que el electrón se encuentra en algún lugar en el interior de una esfera (o algo parecido), que puede ser muy chica o muy grande dependiendo de las condiciones en las que se encuentre el propio electrón. Lo mismo sucede con el protón y neutrón.

¿Qué significa entonces que pensemos en ellos como puntos? lo que debemos tener en mente es que podemos modelar su movimiento como un punto que está localizado en algún lugar de esa esfera. Cuando dos electrones chocan entre sí, debemos imaginar que eso sucede en una infinidad



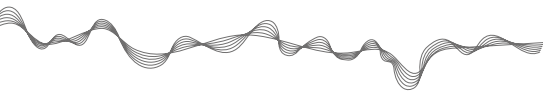
de posibles lugares dentro de esa esfera. Así que para efectos prácticos, los electrones, neutrones y protones no son puntos, pero podemos estudiarlos como si lo fueran siempre y cuando pensemos que no podemos determinar en dónde están dentro de esa esfera imaginaria.

La situación se torna un poco más compleja cuando estudiamos la composición de los protones y neutrones. Pensemos un poco sobre el núcleo del átomo. Si los protones tienen entre sí la misma carga eléctrica, ¿por qué no se repelen? Con base en ello, no podrían existir átomos con más de un protón en el núcleo y entonces todo el universo debería estar formado solo de hidrógeno y sus isótopos, deuterio (hidrógeno más un neutrón) y tritio (hidrógeno más dos neutrones).

La respuesta se encuentra precisamente en el hecho de que los protones no son partículas fundamentales y puntuales. Tienen una estructura interna, pues están formados de quarks. Los quarks están unidos formando al protón y al neutrón debido a la existencia de otras partículas que hacen precisamente que se unan. A diferencia del electrón y los fotones, los quarks responden también a otro tipo de fuerza que es mucho más fuerte, más intensa, que la eléctrica. Así que, a pesar de sentir una repulsión por su carga eléctrica, sienten una atracción debido a esta nueva fuerza que resulta tener ocho diferentes mensajeros llamados gluones (del inglés *glue* que significa pegar).

Un quark siente entonces, al menos dos tipos de fuerzas, la eléctrica y esta nueva fuerza que debido a su intensidad llamamos “fuerza fuerte”. Esto tiene otra implicación: dado que la fuerza fuerte es tan intensa a escalas de los quarks, es prácticamente imposible observar un quark aislado⁶. Lo que se observa es la existencia de un conjunto de quarks y gluones interactuando entre sí y con otras partículas (electrones, fotones, neutrones, protones, etc.) por lo que podemos pensar que en efecto se trata de partículas puntuales. Son nuevamente bien descritos como puntos que colisionan entre sí, pero que para efectos prácticos

⁶ La libertad asintótica de los quarks fue propuesta por David Gross, Frank Wilczek y David Politzer en 1973, razón por la que les fue otorgado el premio Nobel de Física en el año 2004.



no podemos localizar en algún punto específico ni definir el número exacto de partículas que los componen.

Así, nuestra tan esperada concepción de un punto no parece realista, pero es práctica, pues el estudio a través de la interacción puntual nos ha llevado al descubrimiento de una nueva fuerza llamada fuerza fuerte. ¿Será posible que existan otras fuerzas?

La respuesta es sí. Esto se puede observar al tomar un neutrón de algún átomo estable y aislarlo. Un neutrón formando parte de un átomo tiene un promedio de vida muy grande, pero estando solo se desintegra en cuestión de minutos. ¿Por qué?, ¿cómo? Si uno observa con cuidado, el neutrón se descompone en dos partículas muy bien conocidas: un electrón y un protón. Sin embargo, debido a que la energía sumada de estos últimos es menor que la del protón, se intuyó la existencia de una tercera partícula involucrada, a la que se le denominó neutrino⁷. Al igual que las demás, el neutrino se comporta de manera cuántica, es decir, interactúa como un punto, pero no sabemos con certeza en dónde está. Esto responde a grandes rasgos al “¿cómo?” y al “¿por qué?”.

Para poder explicar la razón de la inestabilidad o decaimiento del neutrón cuando se encuentra aislado, los físicos se dieron cuenta que existe otra fuerza, diferente a la electromagnética y a la fuerte, que es la responsable de que el neutrón se descomponga en otras tres partículas, pero como su intensidad es tan débil, al estar en presencia de otras partículas como los protones (o quarks) se ve atenuada. Al estar el neutrón libre, esta fuerza actúa sin oposición y destruye al neutrón. Esta es la llamada fuerza débil y también se transmite a través de partículas; de hecho, tiene tres diferentes mensajeros de la fuerza que desgraciadamente no tienen nombres tan llamativos como los gluones o los fotones. Se llaman Z , W^+ y W^- . Hubiera sido divertido haberlos llamado, por ejemplo, “debilones”, pero eso no sucedió.

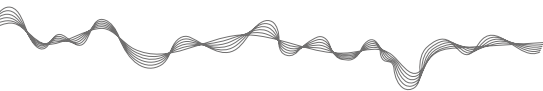
⁷ El neutrino (del electrón) fue propuesto por Wolfgang Pauli en 1930 y observado en 1956 por Clyde Cowan y Frederick Reines.



Figura 3. Conjunto de partículas elementales que conforman la materia y sus interacciones. Elaboración propia.

Basados en estos resultados, y después de observar miles de millones de colisiones entre partículas, los físicos han logrado clasificar las partículas elementales (aquellas lo más parecidas a los puntos fundamentales que andamos buscando). Los bloques que conforman a la materia están ordenadas en tres grupos, mientras que un cuarto grupo corresponde a los mensajeros de las fuerzas que aparecen a esa escala (ver figura 3).

El primer grupo consiste en un electrón, el neutrino asociado al decaimiento del neutrón en un electrón, y dos quarks (up y down). Los dos siguientes grupos son partículas con las mismas cargas bajo las diferentes fuerzas que los del primer grupo, pero con masas mayores. Al electrón y a sus dos versiones más pesadas se les llama leptones. Existen tres diferentes neutrinos (asociados a tres diferentes decaimientos) y tres pares de quarks. En lo que respecta a los mensajeros de las fuerzas, tenemos al fotón, tres partículas relacionadas con a fuerza débil y ocho gluones, para un total de doce diferentes mensajeros de las tres fuerzas que actúan



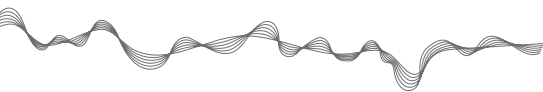
a nivel subatómico. Y por último, la partícula que provee de masa a los mensajeros de la fuerza débil, llamado bosón de Higgs, en honor a Peter Higgs quien propuso su existencia en 1964. Aunado a ello, se encuentran las antipartículas, que tienen las propiedades de las originales, excepto por la carga eléctrica. Fueron predichas por Paul Dirac al construir una versión relativista de la mecánica cuántica.

Este conjunto de 25 partículas y la manera en que responden a las diferentes fuerzas se conoce como el Modelo Estándar de Partículas y es el modelo físico-matemático más exitoso en la historia de la humanidad. Predice con una exactitud asombrosa cientos de propiedades de las partículas y de sus interacciones⁸.

A pesar de que hay aún muchas preguntas no resueltas por este modelo (las cuales dejaremos para después), en este momento podemos sentirnos afortunados de haber logrado lo que parecía una mera especulación: los puntos esenciales parecen existir. No se comportan como pelotas, pero están ahí, formando parte de todo lo que conocemos, de todo lo que tocamos, vemos y olemos. El universo entero se comporta con base en las propiedades de estos puntos. Podemos decir con autoridad que sí, que los puntos existen en la naturaleza.

¿Con lo que hemos aprendido podemos entender por qué existen diferentes elementos químicos? Recapitulemos y tratemos de entender cómo se forma un átomo a partir de estas partículas elementales. Debido a la fuerza fuerte transmitida por los gluones, tres quarks se unen y forman protones y neutrones. Estos a su vez sienten una fuerza de atracción entre sí a través de un par de gluones que forman lo que se conoce como un pión. Pero los quarks también tienen carga eléctrica, por lo que una combinación de ellos, la que forma

⁸ La formulación del modelo estándar de partículas fue un proceso de construcción que tomó alrededor de tres cuartos del siglo XX. Es el resultado de la colaboración de brillantes mentes de diversos países entre 1927 y 1980. Destacan Born, Heisenberg, Jordan, Dirac y Pauli en los inicios de la electrodinámica cuántica cuya versión final realizan entre otros Tomonaga, Schwinger, Feynman y Dyson a finales de la década de 1940. La teoría electrodébil, resultado de la unificación de la electrodinámica cuántica y de la fuerza débil, fue iniciada por Fermi en 1932 y formulada entre 1961 y 1967 por Glashow, Weinberg y Salam, ganadores del premio Nobel de Física del año 1979. Finalmente, se incorpora la fuerza fuerte en el contexto de la teoría cuántica de campos entre los años 1970 y 1973.



un protón, posee carga eléctrica, mientras que la combinación que da lugar a un neutrón, no posee carga eléctrica. Eso hace que a pesar de tener carga eléctrica, un conjunto de protones y neutrones pueden estar unidos por la fuerza fuerte que es mucho más grande que la repulsión eléctrica que existe entre ellos (ver figura 4).

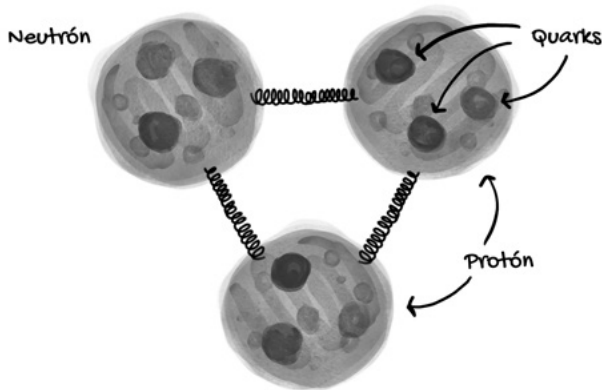


Figura 4. A pesar de la repulsión eléctrica existente entre protones, estos se mantienen unidos junto con los neutrones en el núcleo de un átomo debido a la existencia de la fuerza fuerte entre los quarks que los conforman.

Como hay una carga eléctrica, los electrones que también poseen carga eléctrica, pero de signo opuesto, se sienten atraídos a ese conjunto de protones y neutrones, pero no pueden ir al mismo lugar, al mismo punto en el que se encuentran aquellos, pues la incertidumbre cuántica se los prohíbe. Tendrían que tener una cantidad de movimiento muy grande para poder estar en el mismo sitio que protones y neutrones (incertidumbre de posición muy pequeña e incertidumbre en cantidad de movimiento muy grande), pero por esa misma razón podrían escapar de la atracción eléctrica.

Así que los electrones pueden unirse a los neutrones y protones, pero a una distancia segura, que permita tener una incertidumbre finita en posición y cantidad de movimiento. Esto es el átomo. El átomo es un conjunto de electrones atraídos por un núcleo con carga eléctrica positiva que existe gracias a la presencia de las fuerzas fuerte y débil.

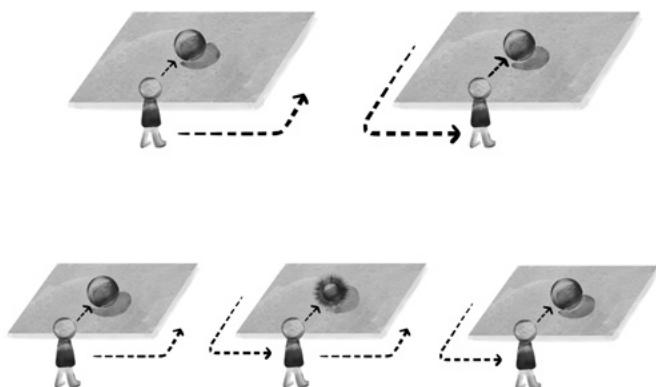
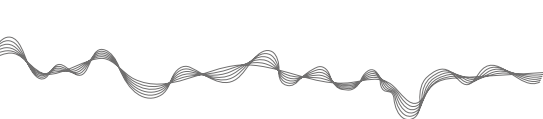
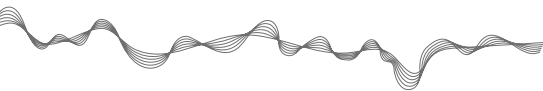


Figura 5. En las dos imágenes de arriba, un observador da una vuelta alrededor de una partícula de espín 1, por lo que no observa cambio alguno. En las imágenes de abajo, el observador da una vuelta alrededor de una partícula de espín $1/2$, por lo que necesita dos vueltas para ver a la partícula igual que al inicio.

Si esto es todo, ¿por qué vemos en la naturaleza diferentes tamaños de átomos? ¿pueden todos los electrones tener la misma energía y por ende estar a la misma distancia (hasta donde la incertidumbre cuántica lo permita) del núcleo atómico? La respuesta es un rotundo no. La razón es que todas las partículas que creemos fundamentales, y por lo mismo, todas aquellas que resulten de una combinación de estas, poseen otra propiedad cuántica llamada espín⁹ que determina de manera unívoca cuándo podemos tener un conjunto de partículas con las mismas cantidades cuánticas.

¿Qué es el espín? El espín es una propiedad intrínseca de cada partícula, es decir, que siempre la posee no importa las condiciones en las que se encuentre. Para decirlo en términos muy sencillos, el espín es un número que nos dice cómo se comporta una partícula cuando la rodeamos en una trayectoria completa (ver figura 5), lo cual es equivalente a rotar el espacio en el que se encuentra. De esta manera,

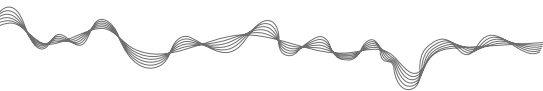
⁹ La palabra espín proviene del inglés “spin”. Estrictamente debíamos referirnos a esta propiedad con su contraparte castellana y hablar del “giro” de la partícula. Sin embargo, la palabra “espín” tuvo mayor arraigo. Esto puede significar una ventaja para los hispanohablantes, pues la palabra “giro”, al igual que “spin”, sugiere que la partícula rota sobre su propio eje, adjudicando un movimiento de rotación a la partícula. Ello, a pesar de usarse muchas veces con propósitos de divulgación, carece de sentido pues un punto no posee eje de giro.



el espín es un número que indica cuántas veces debemos rodear a una partícula para que luzca exactamente igual. Si la partícula no sufre ningún cambio después de darle una vuelta, decimos que tiene espín entero, pues igual podemos darle dos o más vueltas y seguirá sucediendo lo mismo. Uno esperaría que este fuera el único caso, pero la mecánica cuántica mostró que existen partículas que no se comportan como uno lo espera. Por el contrario, hay un tipo de partículas que al rodearlas una vez, lucen diferente. Es necesario darles al menos un par de vueltas para que luzcan igual. A estas partículas se les asigna un espín semi-entero.

Para comprenderlo mejor pensemos que el número uno representa llegar al estado en el que la partícula luce igual que al inicio y que el espín es el número uno dividido por el número de vueltas que se requieren, por lo que si necesito dos vueltas para ello, el espín asignado es $1/2$, puesto que $1/2 + 1/2 = 1$. Si hablamos sobre en qué sentido hacemos la vuelta, esta puede ser en el sentido horario o anti-horario. A esto le llamamos la orientación de espín, que en este caso puede ser positiva o negativa, $+1/2$ o $-1/2$. Notemos que no dar vueltas, no es una opción para las partículas de espín semi-entero (¿cómo saber si ya se dio una vuelta o dos?), pero sí lo es para una partícula de espín entero. Así, si el espín es uno, podemos tener una proyección de espín igual a -1 , 1 y 0 (dar una vuelta en sentido anti-horario en sentido horario, o no dar ninguna).

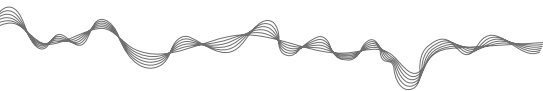
El espín constituye una propiedad que, junto con la masa, la carga eléctrica y las cargas respecto a las fuerzas fuerte y débil, definen el tipo de partícula que estemos considerando y la manera en que interactúan con otras. Un ejemplo de una partícula con espín semi-entero es el electrón. ¿Qué diferencia hace tener espín entero o semi-entero? La respuesta se da a través de una relación muy bonita entre espín y las propiedades estadísticas de las partículas. Para reforzar esta diferencia llamamos bosones a las partículas con espín entero y fermiones a las que tienen espín semi-entero. Lo que se ha encontrado, es que un conjunto de bosones pueden todos ellos tener exactamente los mismos



valores de todas sus propiedades cuánticas: masa, energía, momento angular (cantidad de movimiento de rotación), espín y la proyección de espín.

Por el contrario, un conjunto de fermiones no pueden compartir todas sus etiquetas cuánticas. Al menos uno debe ser diferente. Esto es lo que se conoce como el principio de exclusión de Pauli. Por ejemplo, un electrón en un átomo tiene valores específicos para cada una de esas etiquetas cuánticas. Como tiene espín $1/2$, solo puede tener dos valores de su proyección de espín, por lo que los otros valores deben cambiar. Pero no puede cambiar ni la carga eléctrica, ni la masa, solo su energía. Al aumentar su energía, es más fácil escapar de la atracción eléctrica que siente el electrón con el núcleo y puede ocupar zonas más distantes de este. Eso permite tener diferentes átomos, con diferentes propiedades y cuyas características eléctricas se definen principalmente por los electrones más alejados del núcleo y por tanto más cercanos al objeto con el que el átomo interactúa. Podemos ahora no solo entender a grandes rasgos la existencia del átomo, sino que también podemos comprender cómo diferentes átomos responden ante las fuerzas eléctricas de los electrones más alejados de sus núcleos. Algunos se alejarán entre sí, otros se unirán formando estructuras de pocos hasta centenas de átomos, llamados moléculas.

Cada electrón logra ejercer una fuerza en otro objeto con carga eléctrica, debido a que llena todo el espacio a su alrededor con otro ente, llamado campo eléctrico, que es quien entra en contacto directo con el campo eléctrico que a su vez crea el otro objeto. Así, la fuerza que describe la atracción o repulsión entre átomos es debida a los choques entre sus campos eléctricos. A veces, la disposición de esos electrones permite que los átomos se unan y formen estructuras más complejas: moléculas, redes cristalinas, etc. A veces, lo impiden, como cuando queremos atravesar la mesa con nuestro dedo. Pero en todas estas situaciones, los electrones nunca se tocan. Son puramente interacciones a través de los campos eléctricos. Todo lo que experimentamos día a día es consecuencia de



esas interacciones. La fuerza eléctrica es la responsable de la manera en que percibimos la naturaleza, mientras que las fuerzas nucleares son las responsables de la estructura que nos conforma.

Pero esta descripción no resuelve todos nuestros problemas. Aún no sabemos por qué existen las partículas fundamentales o por qué todos los electrones o fotones, son todos iguales. Cuando tenemos muchas cosas iguales, todo parece indicar que se producen de una misma manera y entonces lo fundamental es el mecanismo por el que se producen. ¿Sucederá esto en el caso de las partículas fundamentales? y más aún, si una partícula no puede localizarse en un punto fijo debido a la incertidumbre cuántica, ¿cómo es que los campos transmiten la fuerza, por ejemplo, la eléctrica, a cada partícula?

La respuesta la ofrece una formulación de la física a altas energías llamada teoría cuántica de campos y que es el resultado de unificar la mecánica cuántica con la relatividad especial. En ella, el campo producido por una partícula debe igualmente tener propiedades cuánticas.

Para comprender qué es un campo cuántico, imaginemos una piscina en donde hemos colocado una red con esferas flotantes en cada intersección de la misma (ver figura 6). Podemos describir de manera cualitativa el movimiento del agua al observar cómo se mueven esas esferas. A veces las variaciones del agua harán que las esferas lleguen incluso a tocarse, evidenciando la presencia de ondas en el agua y diferentes mareas. Hagamos el mismo experimento, pero a un nivel cuántico. Para ello pensemos que analizaremos la dinámica del agua estudiando el movimiento de las esferas, que en este caso hemos reemplazado por átomos. Mas allá de la incertidumbre que tengamos sobre su exacta posición, tendremos una descripción muy precisa de la dinámica del agua, pues podremos en principio “ver” las oscilaciones del agua con precisión atómica. Ya no es continuo, sino un conjunto de partículas.

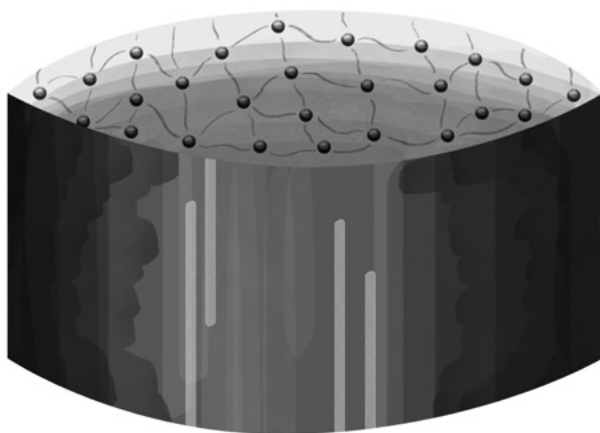
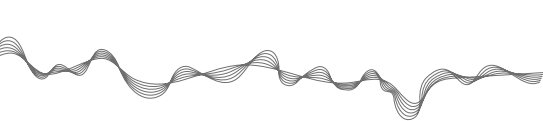
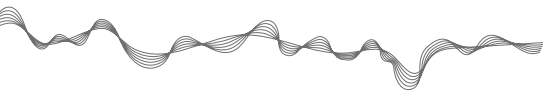


Figura 6. El movimiento del agua en una piscina puede describirse al observar el movimiento de esferas que flotan en su superficie a través de una red. Reemplacemos las esferas por átomos o por electrones y tendremos una idea cualitativa del comportamiento de un campo cuántico.

Llevemos el experimento a una situación más extrema y pensemos en reemplazar cada átomo en la red por electrones y pensemos que están adheridos a esa red, una red que flota en un “mar de algo”. Lo que sea que fuere ese “mar” podremos estudiarlo viendo cómo se mueve su red de electrones. Cada electrón que se mueva indicará una oscilación de ese “mar”, y como sabemos cómo estudiar al electrón de una manera cuántica, tendremos una descripción cuántica del mar asociado. Resulta que ese mar, se denomina campo de electrones, cuyas fluctuaciones en densidad energética son los electrones. Eso responde de manera inmediata a la pregunta de por qué todos los electrones del universo son iguales: son iguales porque ¡todos son el resultado de una fluctuación cuántica de su campo!

Si el concepto de campo de electrones que llena todo el universo les causa confusión, imaginen el caso análogo para algo más familiar, como el campo electromagnético. Las fluctuaciones cuánticas de este campo son los fotones. Cada onda de luz es en realidad un aglomerado de fotones, tal como

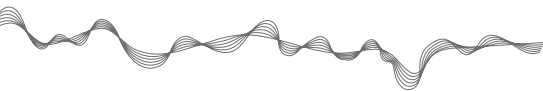


el mar es en realidad un enorme conjunto de moléculas de agua. Pero los campos de electrones y los campos de fotones no son invisibles unos a otros y es así como entendemos que un electrón reaccione ante la presencia de un fotón, o en palabras más familiares, que un electrón sienta una fuerza debido a la presencia de un campo eléctrico.

Para resumir, tenemos diferentes campos cuyas fluctuaciones cuánticas crean partículas idénticas que interactúan entre sí y con las demás partículas. Esta es a grandes rasgos la imagen de la teoría cuántica de campos. El universo en el sentido de la teoría cuántica de campos es la de un universo lleno de diferentes campos: el electromagnético, el de los gluones, el de los bosones de la fuerza débil, de electrones, de quarks, etc.

En conclusión, desde los quarks hasta los átomos y moléculas, tenemos una teoría cuántica que ha permitido entender cómo trabaja la naturaleza a escalas microscópicas y con ello el subsecuente uso de sus propiedades para la construcción de aplicaciones tecnológicas con las que contamos hoy en día, como computadoras y teléfonos celulares. ¿Por qué habríamos de cambiarla?





4. ¿QUÉ SABEMOS DE LO MÁS GRANDE?

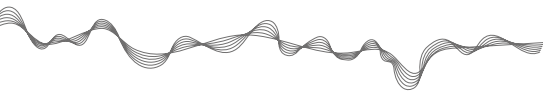
“Si viéramos realmente el universo, tal vez lo entenderíamos.”

Jorge Luis Borges

Hasta ahora hemos dejado a un lado una componente esencial en la comprensión del universo, la que hace que tengamos estrellas, planetas y galaxias. Sí, la fuerza de gravedad. ¿Qué sabemos de ella? ¿Afectará su incorporación a lo que hemos aprendido sobre cómo describir a la naturaleza mediante la interacción de nuestros puntos? ¿Qué sabemos con certidumbre acerca del universo a gran escala?

Sabemos muchas cosas, por ejemplo, que es más grande que la distancia que puede recorrer un rayo de luz durante 13 mil 800 millones de años y que sigue creciendo. Esta expansión hace que cada día, cada segundo que transcurre, exista más espacio entre una galaxia y otra. Salvo las atracciones que existen entre galaxias vecinas debido a la fuerza gravitacional, los grandes objetos que conforman nuestro universo, galaxias, cúmulos de galaxias y super cúmulos, todos se encuentran alejándose unos de los otros.

No es difícil por tanto imaginar cómo era el universo en el pasado remoto. Basta pensar que solo hace un momento, los grandes cúmulos de galaxias estaban más cerca de lo que están ahora



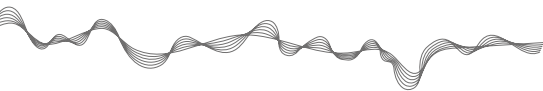
y que hace mucho tiempo, todos los objetos debieron estar muy cerca uno del otro. ¿Podemos comprobar esto? Y si así fue, ¿cómo es que sucedió? La respuesta a esta pregunta abre toda un área del conocimiento que bien merece un nombre: Cosmología. Comencemos entonces un nuevo viaje hacia entender cómo es que podemos tener un modelo que describa al universo que observamos.

Al igual que el sonido que emite un automóvil, las ondas de luz se perciben de manera diferente si son emitidas por un objeto que se aleja o se acerca. Esto es conocido como efecto Doppler y nos permite estimar de manera muy precisa la velocidad a la que se mueven las galaxias. Esto es lo que hace maravilloso al mundo de la ciencia, pues entendiendo los fenómenos que ocurren en un laboratorio que nosotros mismos construimos, podemos deducir y explicar causas y fenómenos de objetos que se encuentran a distancias muy grandes de la Tierra.

Debido a ello es posible concluir que las galaxias que están más lejos de nosotros son las que más rápidamente se alejan. Hay dos posibles explicaciones para ello: o bien somos el centro del universo y debido a algún fenómeno aún desconocido todos los objetos se alejan de nosotros, o bien, este hecho es compartido por cada posible observador habitando cualquier lugar del espacio.

Desde hace años hemos aprendido que colocarnos en un lugar privilegiado del cosmos no solo es una hipótesis sin sustento (más allá de nuestro egocentrismo), sino que nos lleva a conclusiones falsas acerca de la naturaleza. Así que optemos por la segunda opción. ¿Qué hace que todos los objetos se alejen unos de otros? Esto puede explicarse si pensamos que el universo se expande. A cada segundo, la distancia entre dos objetos crece (a menos que se atraigan) debido a que el espacio entre ellos aumenta.

¿Qué significa que el universo se esté expandiendo? De acuerdo a este modelo, todos los objetos que conforman el universo visible, debieron estar más cerca unos a otros en el pasado. Pensemos que una galaxia se encontraba muy cerca de la nuestra cuando el universo era extremadamente denso. A

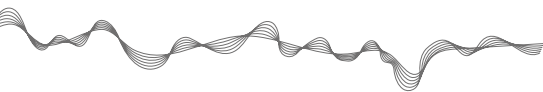


medida que el universo se expande, nos alejamos de esa galaxia, a una velocidad tan grande que aparentemente la distancia entre ambas crece a una velocidad mayor que la de la luz.

La luz que en ese momento emitió nuestra galaxia vecina (una de entre miles que no estaba atada gravitacionalmente a nuestro cúmulo) comienza su viaje hacia nosotros, pero a medida que viaja, la distancia crece y para un observador en una de las galaxias, la luz tarda miles de millones de años en llegar. Cuando finalmente llega, podemos ver qué tan rápido se aleja al comparar su espectro con el de los elementos químicos que conocemos en la Tierra. Una galaxia con una velocidad alta de recesión tendrá sus líneas de emisión muy desplazadas en la dirección en la que se encuentra el color rojo, y por ello se le llama desplazamiento al rojo. Entre mayor sea ese desplazamiento, mayor la velocidad con la que se aleja.

¿Cómo sabemos a qué distancia se encuentra? Una manera de hacerlo es identificando objetos en las galaxias que siempre brillen igual. No pueden ser estrellas, pues su brillo depende de la masa que tengan y de condiciones del medio en el que se encuentren. Afortunadamente existen objetos que sin importar cómo se formaron o en dónde se encuentren, tanto el brillo máximo que alcanzan como la manera en que cambia son prácticamente idénticos. Son las supernovas tipo IA, que se refieren a estrellas enanas blancas que absorben material de una estrella vecina y estallan. Al comportarse de manera casi idéntica, podemos medir el brillo y deducir a qué distancia se encuentran, pues sabemos la manera en que la luminosidad disminuye con la distancia (depende inversamente de la longitud al cuadrado, es decir, el brillo disminuirá cuatro veces más si alejo el objeto brillante dos unidades de distancia que solo una).

Así, podemos medir la distancia a la que se encuentran los objetos en los que hemos podido identificar alguna supernova IA en ellos (sobra decir que esto por sí solo es un arduo trabajo de muchísima gente alrededor del mundo). Con estos dos datos, distancia y desplazamiento al rojo, es sencillo establecer una relación entre ellos. Si por ejemplo, los



objetos más distantes se desplazan a mayor velocidad que los más cercanos, entonces podemos concluir que el universo se encuentra en expansión.

Antes de pensar en la velocidad de la expansión, es muy importante que comprendamos lo que significa que el universo se expanda.

Para ello imaginemos un tablero de ajedrez y coloquemos a un observador hipotético en una casilla. El tablero es tan grande que no podemos ver sus bordes. Cada casilla tiene un tamaño, digamos de un centímetro por un centímetro. Al cabo de un segundo, el tablero aumenta la longitud de sus lados por un centímetro más. Así, su área es ahora de cuatro centímetros cuadrados. Si nosotros estamos en el centro de la casilla, veremos que las esquinas se alejan a una velocidad de aproximadamente 1.3 cm por segundo. Pero la esquina de la casilla en contra esquina (ver figura 7), tendrá una velocidad de aproximadamente 3.9 cm por segundo. Es decir, que para un observador en el centro de cualquier casilla, las esquinas de las casillas más distantes, se alejarán a una velocidad mayor que las cercanas. Esto solo es una consecuencia de que todo el espacio está aumentando y es a lo que llamamos la expansión del universo.

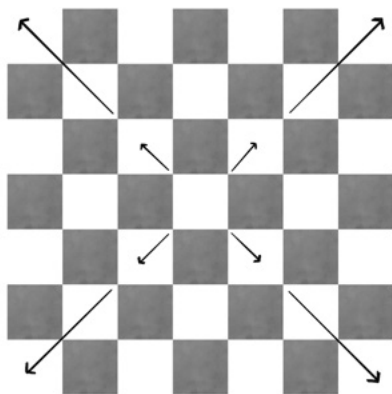
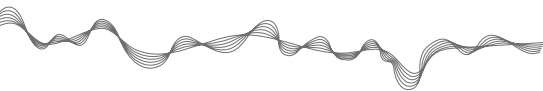


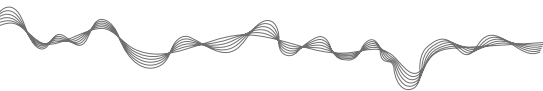
Figura 7. Un observador colocado en la casilla blanca del centro verá que las casillas mas lejanas se moverán más rápido ante un aumento global del tamaño de las casillas. Ese mismo efecto será visto por cualquier observador en cualquier casilla.



Ahora bien, esta expansión puede ser constante (la razón del incremento del tamaño de las casillas es siempre el mismo), desacelerada (el tamaño al que aumentan las casillas por cada segundo es menor que en el pasado) o de manera acelerada (el aumento es ahora mayor que antes en el mismo lapso). ¿Qué es lo que esperamos?

Dado que la única fuerza que actúa en la materia eléctricamente neutra (en promedio) es la fuerza de gravedad que hace que los objetos sientan una atracción entre ellos, esperamos que la expansión del universo sea desacelerada, es decir, que gradualmente se detendrá y toda la materia tenderá a unirse. Es posible quizá, que la velocidad de la expansión sea tan grande, que ni toda la fuerza de atracción debida a la gravedad permita detener la expansión y entonces el universo continúe expandiéndose a una velocidad constante para toda la eternidad. Pero definitivamente no esperamos que se acelere, pues ello resultaría desconcertante. Sería como si lanzáramos un objeto hacia arriba y en lugar de caer, se moviera más rápido hacia arriba, como si se tratara de un cohete espacial que está siendo lanzado. En este último caso, sabemos que el cohete se mueve cada vez más deprisa debido a la fuerza de sus motores, pero en el caso del universo, solo tenemos la fuerza de gravedad que debería causar el efecto contrario, desacelerar su expansión. No esperamos pues una expansión acelerada. Y eso es lo que hace maravillosa a la ciencia y su estudio de la naturaleza. Poco importa lo que esperemos. Si observamos fenómenos que eran de esperarse basados en nuestros conocimientos, significa que nuestro conocimiento es válido para su descripción. Si no, significa que hay algo que aún no hemos comprendido. Y eso justamente es lo que sucedió en este caso.

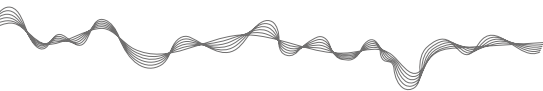
Las observaciones con las supernovas Tipo IA indican que el universo se expande de manera acelerada y la razón de ello puede explicarse en el contexto de la teoría de la relatividad general, propuesta por Albert Einstein en 1915 (cuando tenía 36 años), para hacer compatibles la teoría de la gravedad de Newton con la propia teoría de la relatividad que Einstein había desarrollado en 1905.



Hagamos una pausa y veamos lo que significa “hacer compatibles” estas dos teorías. Hasta principios del siglo XX había dos grandes pilares de la física: el electromagnetismo, desarrollado principalmente durante todo el siglo XIX y la mecánica de Newton, que se conocía desde el siglo XVII. Esta última abarcaba la descripción de la fuerza de gravedad entre cualesquiera dos objetos con masa, lo que permite explicar desde la caída de una manzana, hasta la órbita de los planetas, reproduciendo de manera exacta las leyes de Kepler sobre el movimiento de los planetas.

El electromagnetismo, por otro lado, describe la dinámica de los objetos (macroscópicos) que poseen carga eléctrica. Así, un objeto con carga eléctrica ejercerá una fuerza sobre otro objeto que también la posea. La fuerza podrá ser de repulsión o atracción dependiendo del tipo de carga que tengan esos objetos. Esto permite clasificar la carga en dos tipos diferentes a los que llamamos carga positiva y negativa. Decimos que hay una fuerza entre los dos objetos, porque su estado de movimiento se altera cuando los acercamos lo suficiente, es decir, que si uno de ellos está en reposo y acercamos el otro, el primero tenderá a ponerse en movimiento. La atracción o repulsión se genera sin haber contacto entre ellos. Sin embargo, de acuerdo a Newton, las fuerzas se dan por contacto, por lo que es necesario que “algo” de uno de los objetos con carga eléctrica, “toque” al otro “algo” del segundo objeto. Como ya mencionamos, a ese “algo” le llamamos campo eléctrico. Si el objeto con carga eléctrica permanece en reposo o posee una velocidad constante, el campo eléctrico asociado no depende del tiempo, es decir, también es una cantidad constante.

Sin embargo, con la existencia de cargas eléctricas, existe una manera de hacer una diferencia explícita entre estar en reposo o tener una velocidad uniforme. En el primer caso, como ya dijimos, hay un campo eléctrico. En el segundo, se genera a la par del campo eléctrico, un campo magnético proveniente de la corriente eléctrica al tener una carga en movimiento, y que es responsable de la aparición de la fuerza magnética, esa misma que nos hace jugar con imanes.

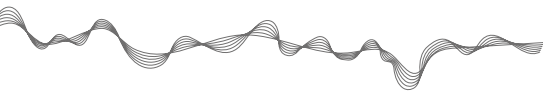


Al parecer tenemos un problema, dado que podemos distinguir entre dos estados de movimiento, en reposo y a velocidad constante, que de acuerdo con Newton no podrían distinguirse. El aparente problema surge cuando consideramos que “eléctrico” y “magnético” son cantidades absolutas, es decir, cuya existencia y valor no dependen del observador. Cantidades así se encuentran en la mecánica newtoniana y el ejemplo mas icónico es el tiempo. El tiempo es algo que todos los observadores miden y están de acuerdo en sus mediciones, independientemente de su estado de movimiento. Al menos así funciona la física newtoniana.

Tenemos entonces la primera contradicción entre dos teorías que parecen funcionar perfectamente por sí mismas, pero no en conjunto. O la física es la misma para un observador en reposo que con velocidad constante y entonces campo eléctrico y magnético son cantidades relativas al observador, o lo contrario.

Hay otra contradicción que fue la que detonó el trabajo de Einstein en 1905. De acuerdo a las leyes del electromagnetismo, los campos eléctricos y magnéticos al variar en el tiempo, se propagan como una onda. Para una cierta frecuencia esta onda resulta visible para nuestros ojos y le llamamos luz. Hay otras frecuencias que no lo son, como los rayos X o las ondas de radio. Esto es la base de la comunicación por ondas y sus subsecuentes mejoras. El punto es que la velocidad de esa onda en el vacío tiene un valor único, fijo, independiente del observador: la velocidad de la luz. Aunado a ello, de acuerdo nuevamente a la mecánica newtoniana, era necesario que existiera un medio por el cual los campos se propagaran en forma de ondas, como el agua a las olas, o el aire al sonido. Este medio debía ser algo que permeara el universo entero (pues vemos luz de objetos muy lejanos como las estrellas) y que diera el sistema de referencia respecto al cual las ecuaciones de Maxwell predecían una velocidad fija. Nunca pudo detectarse.

Convencido de que ambas teorías debían reconciliarse, Einstein propuso que la velocidad de la luz es constante para



cualquier observador y que era entonces necesario modificar la mecánica de Newton. Derribar a un gigante como Newton, cuya visión del universo había explicado tantas cosas, debía llevarnos a resultados aún más sorprendentes. Y en efecto así lo fue. La reconciliación entre la concepción de Newton y la teoría electromagnética, llamada teoría de la relatividad especial, permite ver al universo de una manera totalmente diferente: los campos eléctricos y magnéticos son etiquetas relativas al observador y más aún, tiempo y espacio también lo son. Lo que medimos como eléctrico es para los ojos de otro observador, eléctrico y magnético. Lo que medimos en cierto estado de movimiento como cinco segundos es para otro observador que se mueve respecto a nosotros, menos de cinco segundos. El espacio-tiempo surge como una necesidad al igual que el concepto de campo. En el fondo es la necesidad de que dos teorías exitosas sean concordantes.

Es en el contexto de la relatividad especial que las fuerzas eléctrica y magnética están realmente unificadas. Es por ello que hablamos de una sola fuerza electromagnética. Los fenómenos magnéticos son también eléctricos y viceversa.

Pero Einstein se dio cuenta que había otra descripción Newtoniana que no concordaba con la teoría de la relatividad especial, y esa era la fuerza de gravedad. El problema radicaba en que la mecánica de Newton la describe como una fuerza instantánea, y de acuerdo con la relatividad especial nada puede viajar más rápido que la velocidad de la luz. Era necesario unificar estas visiones de la realidad en torno a la gravedad. Para ello, Einstein concibió un elemento clave: la fuerza de gravedad es otra cantidad que no puede tratarse como algo absoluto, sino que depende del observador. Un observador sin contacto visual con su exterior y de manera local (por ejemplo, encerrado en una nave) es incapaz de saber si está sujeto a una fuerza de gravedad por estar cerca de un objeto masivo, o si está siendo acelerado en dirección opuesta a la fuerza que siente. En otras palabras, estar en un sistema de referencia local y no inercial (que está siendo acelerado) es indistinguible a estar sometido a una fuerza de gravedad.

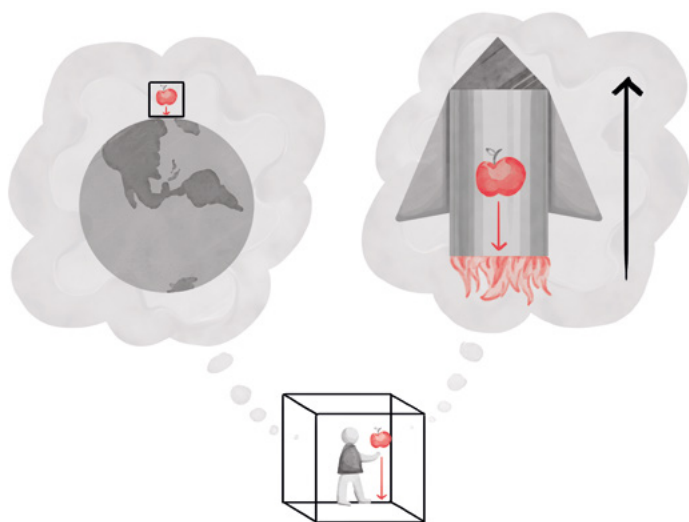
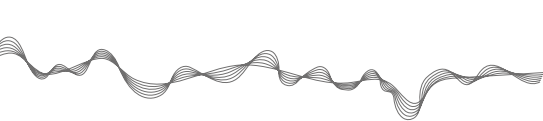
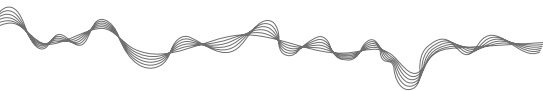


Figura 8. El principio de equivalencia de la relatividad general, dice que un sistema de referencia bajo la acción de un campo gravitacional es localmente indistinguible de un sistema de referencia acelerado. Así, un observador (aislado) no podría saber si la razón por la que la manzana cae hacia el piso se deba a que se encuentra en un planeta con cierta gravedad o en una nave espacial que se acelera mientras viaja alejada de cualquier objeto masivo.

Einstein también concluyó que estar en un sistema no inercial equivale a estar en un espacio curvo (ver figura 8), por lo que la gravedad puede interpretarse como la curvatura del espacio-tiempo en donde el campo gravitatorio dependiente del tiempo también transmite información en forma de ondas.

Las predicciones de la teoría de la relatividad general son varias y asombrosas y más aún, todas han sido verificadas. La primera de ellas, en orden histórico, es la precesión de Mercurio, que a grandes rasgos dice que no existen las órbitas cerradas de los planetas, contrario a lo descrito por las leyes de Kepler y de Newton. En el caso de Mercurio, este hecho es tan visible que era muy bien conocido por los astrónomos de entonces y, aunque había explicaciones alternas, no era posible reproducir el desfase observado en su órbita. Fue con la aplicación directa de la relatividad general que se pudo explicar esta discrepancia con la teoría de Newton.



Otra de sus muy conocidas predicciones es la existencia de los objetos más misteriosos y fascinantes del universo, los hoyos negros, objetos cuya masa está tan comprimida y la fuerza de gravedad es tan grande que se requiere una velocidad de escape mayor a la de la luz. Un hoyo negro es, de acuerdo a la teoría general de la relatividad, una consecuencia inevitable. El estudio de los hoyos negros ha sido extenso en los últimos años. Y es lo que no sabemos, lo que no comprendemos de ellos, lo que hace pensar en un siguiente paso de unificación entre todas las fuerzas que hemos encontrado. Ya hablaremos de ello más tarde.

Por último, tenemos a las ondas gravitacionales, una de las predicciones que más tardó en comprobarse y que daba una solución definitiva y concreta al conflicto de la gravedad Newtoniana con la relatividad especial, pues en aquella la gravedad se transmite de manera inmediata en contraposición con el hecho de que nada puede viajar más rápido que la luz establecido por la relatividad especial (y comprobado experimental y observacionalmente múltiples veces!).

Las ondas gravitacionales son perturbaciones del espacio-tiempo creadas como consecuencia del movimiento de objetos masivos. Así como el movimiento de cargas eléctricas crea ondas electromagnéticas, el movimiento de masas hace que el espacio-tiempo ondule, y la velocidad de las ondas es la misma que la velocidad de la luz. Pero las ondas gravitacionales son mucho más débiles que las electromagnéticas, razón por la cual costó tanto tiempo en detectarlas. Para ello fue necesario contar con la tecnología necesaria para lograr medir variaciones de distancia más pequeñas que el tamaño de un protón. Las ondas gravitacionales se detectaron por primera vez en el experimento LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory, Observatorio de Ondas Gravitacionales por Interferometría Láser) apenas en el año 2018¹⁰. Ello ha permitido la detección de colisiones de hoyos negros y estrellas de neutrones lo que a su vez ha constatado su existencia de manera directa.

¹⁰ La detección de las ondas gravitacionales mereció el premio Nobel de Física del año 2017 a los estadounidenses Rainer Weiss, Barry Barish y Kip Thorne.

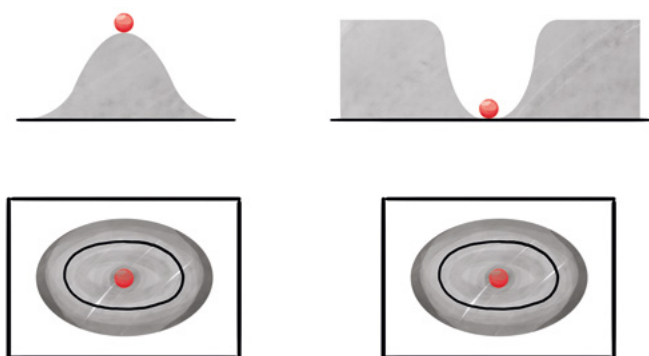
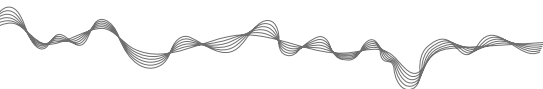
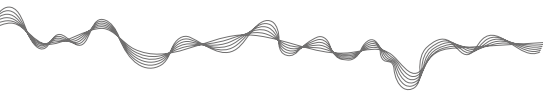


Figura 9. Estado de equilibrio falso (izquierda-arriba) y verdadero (derecha-arriba). Desde arriba, ambos lucen idénticos (abajo).

La teoría general de la relatividad es una teoría tan robusta, que bien puede usarse para saber más del universo a una mayor escala. Esto significa que podemos ignorar la existencia de las otras tres fuerzas de la naturaleza, pues podemos considerar que toda la materia en su conjunto es neutra ante ellas. Así, bajo estas condiciones, la gravedad es la única que domina la dinámica del universo.

Si hacemos esto, ¿a qué conclusiones llegamos? Básicamente se obtiene que el universo no puede ser un ente estático. La teoría de Einstein predice que el universo debe estar en movimiento a pesar de que el propio Einstein no lo aceptara y decidiera incorporar un término extra a sus ecuaciones para lograr el equilibrio. Un equilibrio falso, inestable le llamamos. Es como poner una canica en la cúspide de un pequeño montículo. Ante cualquier perturbación que reciba, caerá, y el aparente estado de equilibrio se destruirá. No sucede lo mismo con la misma canica en el fondo de un hoyo. Podemos moverla un poco, y regresará a su estado inicial. Ese es un verdadero equilibrio. Vistos desde arriba, ambos estados parecen los mismos, pero solo uno de ellos es estable (ver figura 9).

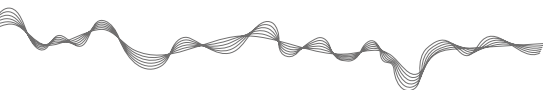
La propuesta de Einstein para tener un universo estático no es estable. Pero ¿por qué quería Einstein y gran parte de la



comunidad científica de entonces, tener una solución estática para el universo? Antes de responder, debemos estar seguros de entender qué significa que el universo sea dinámico. No nos referimos a que haya movimiento entre galaxias. Eso es de esperarse, pues hay fuerzas de atracción entre ellas que hacen que se muevan. No, cuando nos referimos a un universo dinámico, nos referimos a que el espacio-tiempo en sí mismo, cambia, se modifica. No es un fondo fijo en donde colocamos galaxias. Es un fondo dinámico. ¿Cómo podríamos siquiera intuir que el espacio entre galaxias, se modificara con el transcurso del tiempo?

Una manera heurística de verlo es entender que la fuerza de gravedad es la curvatura del espacio-tiempo. Si dos galaxias se atraen, la fuerza de gravedad entre ellas aumenta conforme pasa el tiempo pues está mas cerca. En otras palabras, el espacio entre ellas se curva más. Así el espacio debe ser dinámico. Si la gravedad es la única fuerza dominante, tarde o temprano todas las galaxias deberán sentir una atracción que haga que aumente la curvatura del espacio-tiempo observable. Como una pelota es mucho más curva ante nuestros ojos que la Tierra misma, podemos pensar que si la totalidad del universo que observamos se vuelve más curvo, es porque disminuirá de tamaño. La pregunta entonces es, ¿qué fenómeno ocurrió en algún momento de la evolución del universo que hiciera que en este momento no esté toda la masa comprimida en una pequeñísima región, sino que por el contrario vemos un universo enorme? ¿Está el universo en este momento contrayéndose o en una etapa de expansión que nos permita luego pasar a una etapa de contracción?

Esto fue precisamente lo que Edwin Hubble, astrónomo estadounidense, estudió en 1929 y lo que encontró contradecía la intuición del propio Einstein. El universo, observó Hubble, se encuentra en un estado de expansión, pues las galaxias más lejanas se alejan de nosotros más rápido que las cercanas. La verificación observacional de un universo dinámico en contraposición del universo estático que Einstein intuía, fue lo que Einstein llamó el “error más grande de su vida”, una manera de manifestar el malestar que le causó haber podido predecirlo



antes de las observaciones de Hubble. Pero ni fue un error, ni fue el más grande de su vida. La ciencia está construida sobre una montaña de errores, de desaciertos, de fallas y todo ello es lo que nos permite a la postre comprender mucho mejor ciertas situaciones, como en este caso, la expansión del universo.

El error de Einstein se refiere a la introducción en las ecuaciones de la relatividad general de un término que conocemos como “la constante cosmológica” y que actúa bajo ciertas condiciones, como una fuerza que en lugar de atraer a los objetos con masa y energía, los repele.

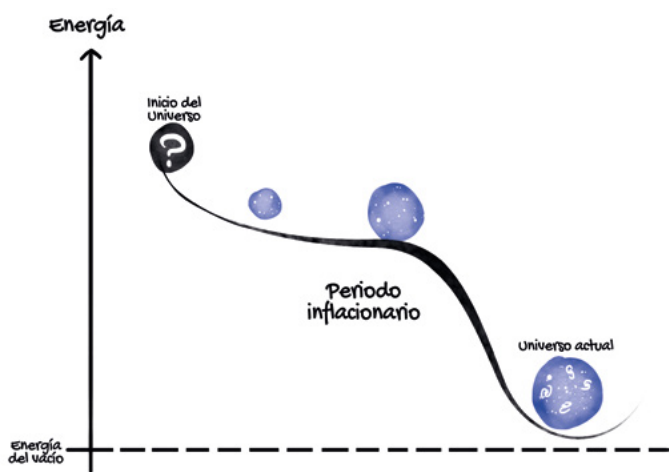
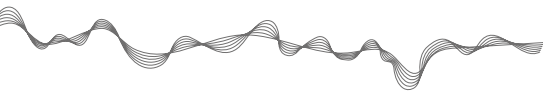


Figura 10. El universo-pelota. La flecha indica la dirección en que la energía crece.

Como mencionamos, ahora sabemos que la expansión del universo está acelerándose¹¹, y es precisamente la constante cosmológica la que da una de las explicaciones más sencillas a esta expansión acelerada. La idea es la siguiente: pensemos que el universo es una pelota que rueda sobre un tobogán (ver figura 10). La altura del tobogán indica la energía que tiene el universo en cada instante. El tobogán puede tener

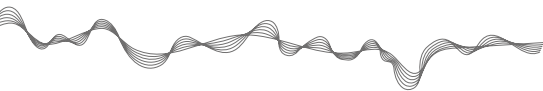
¹¹ El premio Nobel de Física del año 2011 fue otorgado a los estadounidenses Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt y Adam G. Reiss por el descubrimiento de la expansión acelerada del universo a través de observaciones de supernovas distantes.



una parte más baja o continuar bajando indefinidamente. En el primer caso, el universo-pelota llegará al punto más bajo y comenzará a oscilar, es decir, seguirá subiendo, se detendrá y regresará. Si en esta oscilación la energía es transferida a los campos de partículas, el universo-pelota dejará de moverse y gradualmente alcanzará su reposo en el punto mínimo de tobogán. Ese último estado estático es el que Einstein y muchos de sus contemporáneos imaginaban como el único estado posible del universo.

Pero ese estado final depende mucho de la forma del tobogán. Mientras el universo-pelota está rodando, la energía que posee se manifiesta como una expansión del universo (no necesariamente acelerada). Cuando llega al punto más bajo y deja de rodar, su energía es únicamente la que le provee ese punto. A diferencia de la física newtoniana, aquí el valor de la energía del punto mínimo sí importa, pues de acuerdo a la relatividad general, la energía también pesa, es decir, también curva el espacio tiempo, y esto es lo que hace toda la diferencia.

Si el punto más bajo del tobogán de energía es de altura cero (energía cero), el universo seguirá con la inercia del movimiento que tenía que dependerá de la forma precisa del tobogán. Podrá seguir expandiéndose eternamente, aunque cada vez más lento, o detenerse y hacer que la gravedad sea la única fuerza que actúe y colapsar al universo. Si su energía mínima es negativa, producirá el efecto contrario, se detendrá y colapsará. Si por el contrario, es positiva, aun cuando llegue al estado mínimo estable habrá energía suficiente para contrarrestar la atracción gravitacional y el universo se expandirá de manera acelerada. La constante cosmológica es precisamente el valor de la energía en la parte más baja de ese tobogán. Así que el mal llamado error de Einstein, es quizá una de sus más interesantes aciertos, pues podría proveer de la fuente por la que el universo se está expandiendo de manera acelerada.

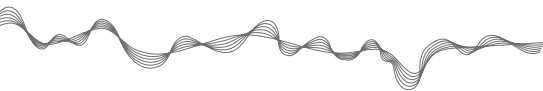


¿Cómo sabemos que todo esto describe realmente al universo en que vivimos?

Si observamos al universo a gran escala y tratamos de encontrar un patrón sobre la distribución de las galaxias, notaremos que la distribución de galaxias parece ser similar en todas direcciones, lo que nos permite suponer que a grandes escalas el universo es homogéneo e isotrópico. Esta suposición claramente no es válida a pequeñas escalas en donde la presencia de objetos rompe con la homogeneidad del espacio. Entonces, la estrategia que se sigue para el estudio del universo es la de definir la estructura del universo a muy grandes escalas y sobre ese fondo comenzar a introducir nuevas estructuras que nos permitan entender y describir la manera en que nuestro universo funciona.

En el modelo estándar de cosmología es posible identificar etapas precisas en que diferentes tipos de materia dominaron la manera en que el universo evolucionaba. Esencialmente tenemos tres tipos de materia; aquella cuya masa la restringe a moverse a velocidades pequeñas, denominada polvo; materia sin masa o moviéndose a velocidades relativistas, como la luz, y a la que se le denomina radiación y, por último, la energía que hace que el universo se expanda, llamada energía oscura y cuya explicación más sencilla es la constante cosmológica.

Estamos entonces ya preparados para construir un modelo sobre la evolución del universo. Dado que actualmente se expande, podemos estar seguros que en el pasado, todas las galaxias y radiación que observamos, se encontraban en un espacio más pequeño. Esto supone una densidad de materia y energía muy grande. Mientras más grande, más en el pasado estamos. Al igual que un gas, si la presión aumenta y el volumen disminuye, la temperatura se incrementa. Entonces el universo en sus etapas iniciales debió haber sido muy, muy caliente. Altas temperaturas no son más que indicios de energías cinéticas muy grandes, por lo que esperamos que los electrones pudieran estar en algún momento tan energéticos

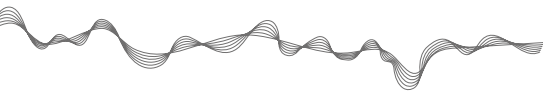


que fuera imposible que estuvieran atados a los protones y neutrones únicamente por la fuerza eléctrica. Si seguimos aumentando la temperatura, veremos que es posible llegar a un punto en el que los quarks no estuvieran unidos por gluones y estuvieran libres. El universo debió consistir de una sopa caliente de quarks, electrones, gluones, fotones y mensajeros de la fuerza débil. Esta visión en retrospectiva del universo tiene consecuencias y predicciones que deben poder verificarse.

Una de las principales predicciones de este modelo es que el universo debería tener actualmente una temperatura muy pequeña y prácticamente la misma en cualquier punto del firmamento debida al momento preciso en que los electrones se enlazaron a protones y neutrones para formar átomos, los primeros en la historia del universo, liberando con ello al espacio de una densidad enorme y permitiendo que los fotones viajaran libremente¹². La medición muestra que el universo tiene una temperatura de 2.7 grados kelvin y al igual que cualquier cuerpo caliente, emite una radiación en diferentes frecuencias. De hecho, el llamado espectro de emisión es casi perfecto, emulando a un cuerpo negro ideal. Además de ello, el modelo estándar de cosmología también predice la cantidad de hidrógeno y helio que debería haber en el universo actual y que ha sido verificada por observaciones astronómicas: 75% y 23% respectivamente.

En conclusión, la unión consistente de la gravedad de Newton y la teoría especial de la relatividad de Einstein, no solo permitió la formulación de un modelo matemático para la gravedad que cambió para siempre la manera en que concebimos esta fuerza, sino que con ella es posible predecir una serie de fenómenos que ocurren en el universo y con los que ahora hemos podido construir un modelo bastante certero sobre el inicio del mismo: hace 13 mil millones de

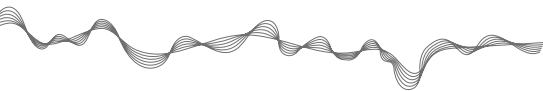
¹² Dicha temperatura fue accidentalmente descubierta en 1965 por un par de ingenieros estadounidenses llamados Arno Penzias y Robert Woodrow Wilson, aunque había sido predicha años antes, en 1948, por los físicos George Gamow, Ralph Alpher y Robert Herman y por Robert Dicke y Yakov Zel'dovich en 1960.



años aproximadamente, toda la materia, luz, energía, fuerzas, estaban concentradas en un espacio mucho más pequeño que el tamaño de un átomo y por ello la temperatura era de miles de millones de grados. Pero el universo, por alguna razón, se expandía y al hacerlo se fue enfriando, permitiendo la formación de átomos, los de hidrógeno primero y después los de helio, y posteriormente formando grandes estructuras como estrellas y galaxias. Este es a grandes rasgos el modelo de “la teoría de la gran explosión”, un nombre muy desafortunado, como mencionaremos más adelante.

El modelo dinámico de la evolución del universo junto con la existencia de los hoyos negros, las ondas gravitacionales, la curvatura del espacio y del tiempo, hasta la propia expansión acelerada del universo, hacen de la relatividad general de Einstein una hermosa teoría que nos permite vislumbrar al universo de manera geométrica y con ello comprender mejor su naturaleza. ¿Por qué habríamos de modificarla?





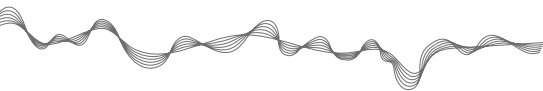
5. ¿QUÉ NO ENTENDEMOS?

“Todo nuestro conocimiento arranca del sentido, pasa al entendimiento y termina en la razón”

Immanuel Kant

¿Qué es lo desafortunado en el nombre de “teoría de la gran explosión”? Pues que nunca hubo explosión, es más, no sabemos qué hubo, porque nuestras teorías dejan de funcionar cuando la gravedad es muy grande y los espacios son muy pequeños. No sabemos qué puede pasar ahí y no sabemos por qué el universo se comenzó a expandir en lugar de contraerse, ni sabemos por qué ahora se expande de manera acelerada, es decir, no sabemos por qué la constante cosmológica (si esa es la manera de entenderlo) es positiva. Pero después de cierto tamaño, sí que tenemos una muy buena idea de lo que ha sucedido, y es básicamente gracias a la comprensión que tenemos de la fuerza de gravedad en el contexto de la teoría de la relatividad de Einstein y de la estructura de la materia y sus interacciones a través de la teoría cuántica de campos.

Cuando no podemos explicar algo con las ideas que tenemos a mano, debemos descartar algunas de ellas. Pero abandonar una idea que nos ha funcionado y que nos ha permitido explicar muchas cosas no es una opción sencilla. Primero, porque cualquier modificación que propongamos deberá explicar esas mismas cosas



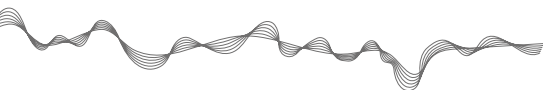
que ya habíamos entendido, y dado que eso ya lo hacia nuestra idea por abandonar, la nueva propuesta debería reducirse a la vieja dentro de ciertas consideraciones.

Segundo, deberá explicar nuevos fenómenos que nuestra primera idea no es capaz de explicar y además deberá proveernos de nuevas consecuencias, nuevos fenómenos que podemos ahora entender o descubrir. En pocas palabras, las nuevas predicciones y explicaciones son las que finalmente corroborarán la nueva propuesta.

Esto ha sucedido en múltiples ocasiones en la historia de la física, y es precisamente lo que ha llevado a tener hasta el momento una concepción del funcionamiento del universo muy cercana al reduccionismo.

El reduccionismo es una forma de concebir a la naturaleza en la que los fenómenos pueden ser siempre explicados en términos de otros más sencillos, más fundamentales. En el caso de la física, pensamos que el orden en que proveemos de la etiqueta “fundamental” está relacionada con la energía en la que ocurren los fenómenos a estudiar. Así, por ejemplo, la energía asociada con un proceso químico es menor que la energía asociada a la unión eléctrica entre un electrón y el núcleo de un átomo y a su vez, esta energía es menor que la que hace que los quarks y gluones se unan para crear un protón. Bajo esta perspectiva, las reacciones químicas siguen ciertas reglas como consecuencia de la naturaleza cuántica de los átomos que la contienen, mientras que estos se forman debido a las características, también cuánticas, de las partículas elementales que los conforman. Pero no solo la química estaría determinada por las partículas elementales.

Si pensamos que de acuerdo con la teoría de la gran explosión todo el universo observable estuvo alguna vez colapsado a un tamaño igual o menor a un átomo, es claro que la física cuántica entre las partículas elementales sometidas a una densidad enorme debieron establecer las condiciones iniciales que hacen que nuestro universo tenga las características que observamos: homogeneidad a gran escala, pero con una aglomeración de materia a nivel local que permitió la formación de galaxias y estrellas (y planetas y nosotros).



Ejemplos de reduccionismo hay muchos. Hemos visto cómo la mecánica de Newton que tan bien funcionó (y funciona) para describir el movimiento de pelotas, proyectiles, planetas e incluso la dinámica galáctica, debe modificarse al considerar velocidades cercanas a la de la luz. La relatividad especial de Einstein es la teoría que toma en cuenta este refinamiento y que efectivamente, se reduce a la newtoniana al considerar el límite de bajas velocidades respecto a la de la luz. De igual forma, la teoría de gravedad de Newton requiere de dos modificaciones que la contengan: velocidades cercanas a la de la luz y una muy intensa fuerza de gravedad. Esto es precisamente lo que hace la teoría general de la relatividad. Pero existen otros límites. Partiendo nuevamente de la mecánica newtoniana, podemos pensar en qué sucede cuando vamos al límite microscópico. La respuesta es la mecánica cuántica, la cual puede ser descrita para partículas lentas o con velocidades cercanas a la de la luz, es decir, no-relativistas y relativistas. Uno puede jugar con los diferentes límites y formar una serie de relaciones como la que se muestra en la figura 11.

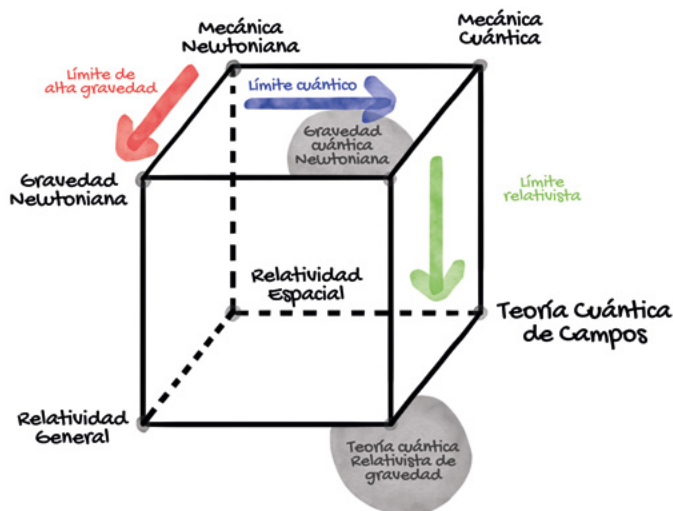
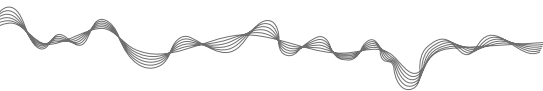


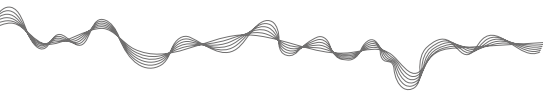
Figura 11. Diferentes límites en los que podemos estudiar a la naturaleza con base en la gravedad, comportamiento cuántico y velocidad respecto a la de la luz. Falta construir una teoría cuántica de la gravedad.



Sin embargo, como podemos observar de esa figura, existe un límite que no hemos descrito aún: una teoría cuántica relativista de la gravedad. ¿Qué entendemos por una teoría cuántica y relativista de la gravedad? Mas aún, ¿en qué condiciones, en qué lugares y en qué situaciones necesitaríamos de una teoría de este tipo?

Comencemos con describir con claridad las circunstancias en las que se requiere de una teoría de gravedad cuántica. De acuerdo a Newton, objetos con masa sienten atracción gravitacional, así que dos electrones que se repelen por su carga eléctrica, deberán también atraerse por su masa. Pero la fuerza de gravedad entre dos electrones es miles de millones de veces más pequeña que la repulsión eléctrica que experimentan, por lo que en términos prácticos podemos despreciar el papel que juega la gravedad. Esto es precisamente lo que se hace en los cálculos usando la teoría cuántica de campos y que resulta ser una muy buena aproximación a la realidad al comparar los resultados con las observaciones que se tienen en los experimentos de los grandes aceleradores de partículas, como el LHC (Large Hadron Collider) en Ginebra, Suiza. Si pensamos en términos de la relatividad general de Einstein, donde masa y energía curvan el espacio-tiempo de tal manera que las partículas siguen trayectorias curvas (lo cual, como vimos se interpreta como la fuerza de gravedad), la repulsión entre los electrones debe considerar la contribución no solo de su masa, sino la energía de sus campos eléctricos y magnéticos. Aún así, la curvatura es tan pequeña, que para fines prácticos podemos solamente considerar la interacción de los electrones en un espacio plano, es decir, podemos ignorar a la gravedad.

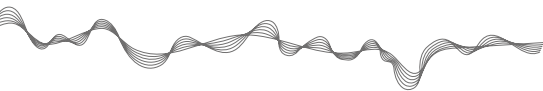
Pensemos ahora en todo el universo, al menos en el que podemos observar. De acuerdo con las observaciones sobre la expansión del universo, las galaxias se encuentran más alejadas hoy que en el pasado y eso hace que podamos pensar que, todo lo que hoy observamos del universo, en el pasado estuviera contenido en un espacio muy pequeño. Bajo esas



condiciones, la energía requerida para tener toda la masa y sus campos restringidos a una zona espacial diminuta, es enorme, tanto que las partículas elementales, quarks, electrones, gluones, fotones, todos, estarían disociados unos de otros, pero chocando continuamente. No habría estructuras como átomos o partículas como los protones o neutrones. Tendríamos una sopa de partículas elementales a una temperatura altísima. Necesitamos la teoría cuántica para describir su dinámica. Pero también, al tener tanta masa y energía, la fuerza de gravedad o equivalentemente la curvatura que producen en el espacio-tiempo, ya no puede ser ignorada.

Tenemos de manera cualitativa un escenario en donde la gravedad cuántica debe usarse para describir lo que sucede. Pero no solo eso, también nos debe responder las nuevas preguntas que nos surgen al pensar que la materia y todo lo que vemos del universo, estuvo en algún momento del pasado tan comprimido, que la densidad de materia y energía era enorme. Para que eso sucediera, como ya dijimos, se requiere de muchísima energía. ¿De dónde salió esa energía? ¿Por qué el universo parece haber comenzado con una energía tan grande?

Esto último contradice mucho de lo que sabemos en física. Todos los sistemas que estudiamos tienden a estacionarse en un estado de mínima energía. Pensemos en un péndulo que oscila. Si lo dejamos por mucho tiempo, tenderá a detenerse mientras sus oscilaciones se acortan conforme pasa el tiempo. En este caso el péndulo comenzó con una oscilación grande, porque le dimos energía para que comenzara desde ese estado. Si lo pusiéramos en el vacío, las oscilaciones continuarían eternamente, pero la causa de su oscilación seguiría siendo la misma. En un laboratorio, la causa somos nosotros, quienes tomamos el péndulo, le transmitimos energía y lo ponemos a oscilar. En el caso del universo, ¿qué lo puso en esas condiciones iniciales? Más aun, sabemos que el universo se expande de manera acelerada. Esto en el caso del péndulo es



como si la amplitud de las oscilaciones aumentara en tamaño conforme pasa el tiempo, sin que nosotros hagamos nada. ¿Cómo explicamos eso?

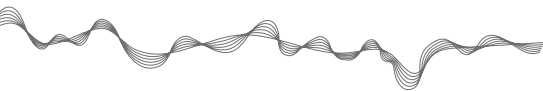
Quizá estemos haciendo las preguntas erróneas, o pensando en términos no adecuados. Por ejemplo, si aplicamos la misma línea de razonamiento al movimiento planetario podríamos preguntarnos qué hizo que los planetas tengan energía de rotación suficiente para no caer hacia el Sol. ¿De dónde vino esta energía?

Si formulamos la pregunta asumiendo que el estado inicial del sistema solar debe considerarse con los planetas tal y como los observamos, no habría respuesta. Sin embargo, si nos permitimos pensar que hubo un estado del sistema solar previo a la formación de los planetas, entonces podemos responder: la energía de rotación proviene de la atracción gravitacional de una masa de gas que al colapsarse hace que los objetos que se forman roten alrededor del centro de fuerza, en este caso el Sol.

¿Es posible entonces que haya un “antes” a la sopa de partículas y quarks que conforma el estado más fundamental que podamos entender con nuestras teorías y que permita explicar cosas que aún no entendemos, como la energía que hizo posible tener todo lo observable concentrado en una muy pequeña región del espacio? Eso es precisamente lo que esperamos que responda una teoría cuántica de la gravedad.

Antes de hablar sobre cómo formular una teoría así, vayamos a otro posible escenario en donde las propiedades cuánticas en torno a la fuerza de gravedad, o curvatura del espacio-tiempo, parecen ser esenciales para una comprensión total del mismo.

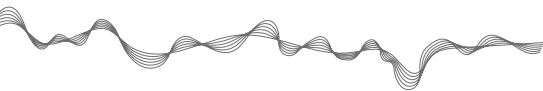
Para ello dirijamos una vez más nuestra vista al cielo, diurno y nocturno, y enfoquémonos en la existencia del Sol y las estrellas. Aunque parezcan totalmente diferentes, ahora sabemos que esencialmente son el mismo objeto: nuestro Sol es una estrella. Si entendemos los procesos por los que el Sol brilla, entenderemos la manera en que brillan todas las



estrellas del universo, y mas aún, podremos comprender las diferentes etapas por las que atraviesan, desde su nacimiento hasta su muerte. ¿Qué tiene que ver esto con gravedad cuántica? Tiene que ver y mucho, sobre todo para algunas estrellas que terminan su vida de una manera extrema.

Veamos cómo ocurre esto. Las estrellas comienzan siendo una masa de gas en el espacio. Las primeras estrellas se formaron por la contracción gravitacional del hidrógeno y helio creados por el enfriamiento de un universo que se expandía. Las grandes nubes de gas, debido a pequeñas fluctuaciones en la densidad de átomos, comenzaron a ser los centros de atracción gravitacional. Conforme los átomos se atraían, también adquirían energía rotacional. Siendo una enorme masa de gas, la fuerza gravitacional es mucho más fuerte que la repulsión eléctrica de los electrones confinados a formar átomos de hidrógeno y helio. Si estas fueran las únicas fuerzas presentes en la naturaleza, no habría nada que detuviera a la gravedad y toda la masa del gas se colapsaría a un punto. Pero ni son todas las fuerzas, ni la materia se comporta como simples pelotas. Son átomos y se comportan bajo las leyes de la mecánica cuántica, lo que cambia de manera notable el resultado final.

Durante el colapso de la nube de gas, llega un momento en que la fuerza de gravedad es tan fuerte que dos átomos de hidrógeno se unen para crear un átomo de helio, formado por dos protones, dos electrones y uno o dos neutrones. La energía que contienen las partículas que conforman al átomo de helio es menor que la suma de la energía de dos átomos de hidrógeno. La energía sobrante es la que escapa, después de unos miles de años debido a lo denso del objeto, como luz y radiación. La presión hacia afuera de la estrella provocada por ese escape de energía, detiene el colapso gravitacional: una estrella se ha formado. El proceso descrito se llama fusión nuclear y se puede entender de manera muy precisa usando las reglas de la mecánica cuántica, la cual también predice que parte de la energía sobrante consiste también de neutrinos, esas partículas fantasmales de las que hablamos cuando describimos las cosas muy pequeñas. Experimentos recientes como Super-Kamiokande en Japón o el

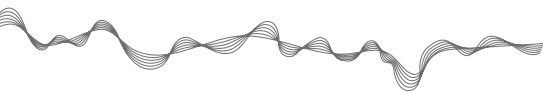


SNO (Subdury Neutrinos Observatory) en Canadá, demuestran la existencia de neutrinos emitidos por el Sol.

¿Por qué solo dos átomos se fusionan en otro y no más? Bueno, para ello se requiere más energía, y la única fuente es la propia gravedad, por lo que para crear otros átomos, necesitamos de una fuerza de gravedad más intensa. Esto sucede cuando todo el hidrógeno de la estrella, o al menos el que se encuentra en su núcleo, se agota. Al no haber presión de energía que equilibre la fuerza gravitacional, la estrella vuelve a colapsarse, la temperatura aumenta y hay suficiente energía para ahora fusionar dos átomos de helio y formar uno de litio, y así sucesivamente.

Al pasar de los años, y dependiendo de la masa inicial de la nube de gas, la estrella se convierte en un objeto con varias capas, como una cebolla, en donde diferentes procesos de fusión están ocurriendo. El límite para la creación de elementos químicos más pesados lo establece el hierro. Átomos más pesados que el hierro, es decir, con más electrones, ya no pueden ser creados por fusión, pues se necesita más energía que la que otorga la propia gravedad, pues como vimos, los electrones de las últimas capas de energía de un átomo requieren mucha energía para unirse al núcleo, consecuencia de la existencia del espín. Parecería nuevamente, que ya nada podría detener el colapso gravitacional, y la masa de toda la estrella, formada de puro hierro, debería colapsarse a un punto. Pero no es así. Nuevamente, aspectos cuánticos, más fundamentales que los que se manifiestan a nivel atómico, juegan un papel fundamental.

Al no haber ningún proceso de fusión que provea de una radiación cuya presión se oponga a la fuerza de gravedad, los átomos se “rompen”, liberando a electrones, protones y neutrones. La fuerza de gravedad tiende a unirlos, pero los electrones más allá de su repulsión eléctrica, no pueden ocupar el mismo espacio, pues son fermiones y obedecen el principio de exclusión de Pauli. La fuerza necesaria para vencer este hecho fundamental, permite llegar a un nuevo estado estacionario: una estrella en un estado de densidad enorme, en equilibrio únicamente gracias a la repulsión cuántica, no eléctrica, de los electrones. Se le llama una enana blanca.



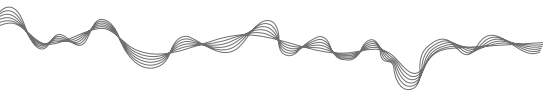
¿Es esta repulsión capaz de frenar siempre a la fuerza de gravedad? No. Si la fuerza de gravedad es lo suficientemente intensa, hará que electrones y protones interactúen a través de la fuerza débil y creen neutrones y neutrinos. Al ser los neutrones partículas compuestas de quarks y gluones, y siendo los quarks también fermiones, el principio de exclusión de Pauli vuelve a operar a estas más altas energías como una fuerza que contrarresta a la de la gravedad. Se ha formado una estrella de neutrones¹³. En el proceso, debido a que la gravedad debe ser muy intensa, el tamaño de la estrella disminuye y por lo tanto aumenta su rotación. Las estrellas de neutrones generalmente tienen rotaciones muy grandes, con cargas eléctricas en su superficie que producen campos magnéticos muy intensos y dirigidos que hacen que las partículas cargadas en su superficie salgan disparadas a velocidades enormes, en ocasiones, cercanas a la velocidad de la luz. A estos objetos también se les conoce como pulsares.

¿Es este el estado final de una estrella? No. Si la masa de la estrella es aún más grande¹⁴, la fuerza de gravedad será también más grande y vencerá la repulsión entre quarks debido al principio de exclusión de Pauli. Habrá tanta energía que los quarks dejarán de estar confinados para formar neutrones y tendremos nuevamente una sopa de quarks y gluones. Es posible que un estado estable se presente y tengamos estrellas de quarks, aunque estas nunca han sido observadas o al menos no hay indicios de su existencia.

¿Qué pasaría si la masa es aún más grande, tal que la fuerza de gravedad no pueda ser frenada ni aún con la repulsión fermiónica entre quarks? La mayoría de los textos nos dicen que al no haber nada que prevenga la dominación de la fuerza de gravedad, toda la materia se colapsa hacia un punto. Esto quizá no sea del todo cierto, pero volveremos a este punto en unos minutos más. Por el momento pensemos que es así.

¹³ En 1983, el físico hindú-estadounidense Subrahmanyan Chandrasekar recibe el premio Nobel de Física por sus estudios de los procesos químicos en la formación y evolución estelar. Encontró que si la masa estelar excede 1.44 veces la masa del Sol, la estrella colapsará a una estrella de neutrones o agujero negro. A este valor se le conoce como límite de Chandrasekar.

¹⁴ Si la masa excede aproximadamente 2.2 veces la masa del Sol, la estrella no puede detenerse en su fase de estrella de neutrones y colapsa a un agujero negro. Este es el límite de Tolman-Oppenheimer-Volkov.



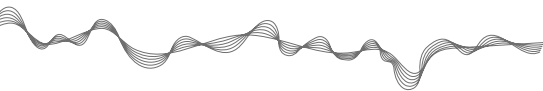
No hay nada en la física que conozcamos que nos permita pensar en un escenario en que podamos detener el colapso gravitatorio. Es más, la fuerza de gravedad es tan intensa al estar la masa tan concentrada, que para poder escapar de ella se requiere una velocidad mayor que la de la luz. Como nada puede viajar más rápido que la luz, nada puede escapar de este objeto. Se ha formado un hoyo negro.

Hablar en detalle de los hoyos negros y sus propiedades nos llevaría un libro completo. Es un tema fascinante y su existencia es una predicción concreta de la teoría de relatividad de Einstein. El colapso de la materia en un punto, al que llamamos singularidad, es un destino inevitable para estrellas muy masivas, tal como lo demostró Roger Penrose¹⁵ y Stephen Hawking en 1964.

La existencia de objetos con propiedades similares a las esperadas en un agujero negro ha sido confirmada a través de la detección de ondas gravitacionales en el experimento LIGO desde el año 2016. ¿Pero qué tan cierto es que los agujeros negros se formen por el inevitable colapso de la materia? Estrictamente lo que debemos decir es que no sabemos cómo se comporta la materia a escalas microscópicas con fuerzas de gravedad intensas. El objeto que se forma manifiesta propiedades similares a los agujeros negros predichos por la teoría de relatividad general, pero más allá del horizonte de sucesos, es necesario que tengamos una descripción en base a una teoría cuántica de la gravedad.

Finalmente, un tercer punto que nos indica que debemos construir una formulación nueva que nos permita describir estados de gravedad cuántica, es la incompatibilidad entre la teoría de la relatividad general y la teoría cuántica de campos. Como hemos descrito, la primera considera a la gravedad como el resultado de la curvatura del espacio-tiempo debido a la presencia de materia y energía, mientras que la segunda considera que las partículas a pesar de no

¹⁵ Roger Penrose, físico británico, recibe el premio Nobel de Física en el año 2020 por sus estudios que indican que la formación de agujeros negros es una predicción robusta de la teoría general de la relatividad.



ser descritas puntualmente, interactúan con las demás de manera puntual, además de predecir que lo que pensamos como un vacío, es en realidad una sopa de creación aleatoria de partículas. El resultado de querer describir a ambas de manera consistente en un fenómeno que las involucre, no solo lleva a contradicciones conceptuales sino a cálculos y predicciones absurdas. Conceptualmente, perdemos capacidad de control sobre la gravedad pues es imposible asignar una geometría a la creación aleatoria de materia y energía a nivel cuántico.

Si por el contrario pensamos en la gravedad como un campo cuántico, podemos describir la interacción de la materia a través del intercambio de gravitones, partículas cuánticas e hipotéticas, encargadas de transmitir la fuerza de gravedad y de contribuir infinitesimalmente a la curvatura del espacio-tiempo. De esta visión, podemos deducir algunas propiedades importantes del gravitón, como el hecho de que no posee masa, viaja a la velocidad de la luz, al igual que las ondas gravitacionales y posee un espín entero con valor igual a dos, es decir, es un bosón.

Entonces, al igual que un frente de luz nos parece algo continuo cuando en realidad está formado por miles de millones de fotones, esperamos que la curvatura del espacio-tiempo sea consecuencia de tener un enorme número de gravitones. Sin embargo, la interacción de gravitones, ya sea consigo mismos o con otras partículas con masa, es de acuerdo a la teoría cuántica de campos, una interacción puntual (ver figura 12).

Debido al principio de incertidumbre, eso implica que la cantidad de movimiento que tiene el gravitón puede tomar cualquier valor, desde cero hasta infinito y debemos considerar todas las posibilidades. Es este hecho el que arroja resultados infinitos en el cálculo de las probabilidades con las que un gravitón interactúa con otro. En términos llanos, no podemos decir nada. Tenemos una formulación que no permite decir cómo es esa interacción. Este es el choque entre gravedad y teoría cuántica.

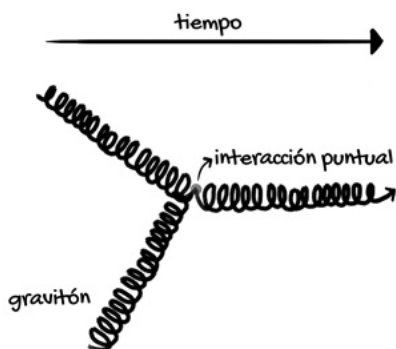
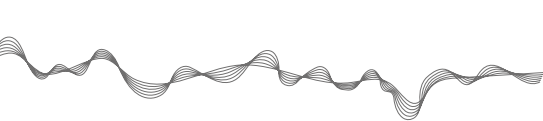
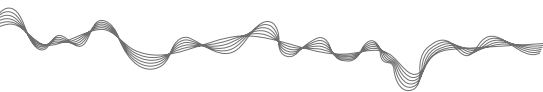


Figura 12. Diagrama que muestra la interacción puntual de gravitones (representados por la hélice).

Situaciones similares han dado lugar a la creación de teorías y formulaciones más ricas y ambiciosas y eso mismo esperamos en esta ocasión. Para ello debemos cambiar paradigmas, abrirnos a la posibilidad de que lo que damos por hecho, quizá solo sea otra aproximación más de la realidad.

En nuestro caso haremos algo aparentemente sencillo. Si el resultado trágico de los infinitos proviene del hecho de asumir interacciones puntuales, entonces renunciemos a esa idea. Permitamos que las interacciones estén extendidas y que los posibles valores de la cantidad de movimiento no tomen valores infinitos. En otras palabras, renunciemos al punto de una vez por todas, en todas sus manifestaciones físicas. ¿Tiene eso sentido?





6. DEL PUNTO A LAS CUERDAS

“El amor es como un violín. La música podrá detenerse, pero las cuerdas lo recordarán por siempre.”

Silvio Rodríguez

Hemos visto que es posible hacer propia una idea abstracta, matemática, como indicio de nuevas estructuras básicas en la naturaleza, en este caso la de encontrar los componentes fundamentales de los que están formados todos los objetos, pensando en ellos como partículas puntuales.

Si lo pensamos bien, la idea de suponer que los componentes fundamentales sean partículas es consecuencia de una abstracción, de una simplicidad en nuestra mente. Que ello sea verificable de manera experimental es asombroso. Pensemos por ejemplo en la suposición de que la Tierra era el centro del universo, una hipótesis que muy rápidamente tuvo que ser desechada ante la evidencia observacional. En el caso de los bloques fundamentales de la naturaleza, la suposición de que son partículas puntuales concuerda muy bien con lo que hasta ahora hemos verificado de manera experimental, sobre todo en los aceleradores de partículas.

Sin embargo, a pesar de que ha sido muy interesante y de mucha utilidad pensar en los puntos, hay ciertas ideas que nos han llevado a concluir que no es del todo preciso pensar en ello y que existe la duda sobre ir más allá del punto y

sobre todo, que hay preguntas que el concepto de punto parece no poder responder.

Como ejemplo de lo anterior, podemos recurrir al conocimiento que tenemos de la interacción gravitacional, la cual no puede ser entendida si seguimos pensando en su versión cuántica como lo hemos hecho para las otras tres fuerzas. Algo debe cambiar.

La propuesta en la que nos enfocaremos es la de renunciar al punto como objeto fundamental, tanto como partícula como modelo de interacción (la interacción ocurre en un punto en el espacio). ¿Qué sucedería si en realidad ni los puntos ni las interacciones puntuales existen? Propongamos un modelo en el que los objetos fundamentales no son puntos, sino que son líneas que pueden moverse y oscilar como una cuerda. Llamémosles simplemente cuerdas (ver figura 13). Describir la naturaleza de la gravedad cuántica, sus consecuencias en la evolución y origen del universo, en la naturaleza de los agujeros negros, en explicar la razón por la que el modelo estándar de partículas es cómo es, de manera consistente con las teorías ya existentes, es el objetivo de esta nueva propuesta llamada teoría de cuerdas. Y sí, es un objetivo sumamente ambicioso.

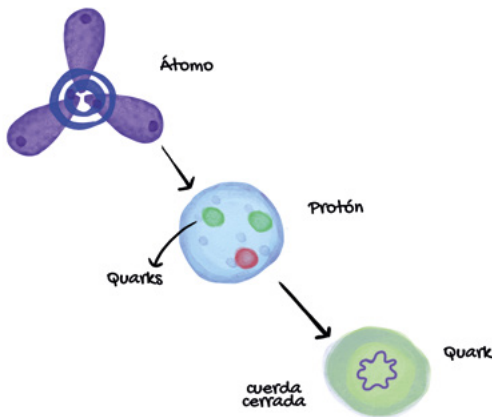
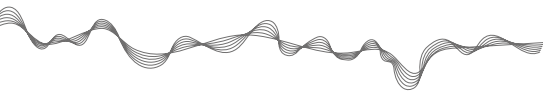


Figura 13. La teoría de cuerdas propone que las partículas fundamentales son cuerdas cuyas diferentes vibraciones dan lugar a la variedad de partículas observadas, como los quarks y electrones.

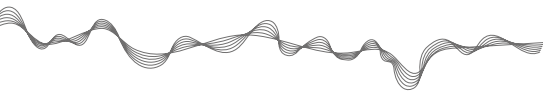


Si pensamos que todo está hecho de cuerdas, primero debemos ser capaces de explicar por qué existen objetos que nos parecen puntuales, es decir, ¿por qué no vemos cuerdas? Ello se puede explicar al proponer que la longitud de las cuerdas es tan pequeña, que todos nuestros instrumentos de medición son tan burdos comparados con ellas que no podemos distinguir su longitud. Es como tratar de medir la longitud de una aguja en la Luna, midiéndola desde la Tierra con nada más que nuestros ojos. Esperamos entonces que la longitud de las cuerdas sea muy pequeña.

¿Es eso una simple salida para poder justificar una proposición que aparentemente no podemos verificar de forma directa? No, y antes de continuar describiendo la teoría de cuerdas, es importante hacer dos observaciones: la primera es que la predicción o suposición de la existencia de algún objeto que no podamos observar de manera directa, no es única de la teoría de cuerdas. Basta recordar que en el modelo estándar de partículas se tiene la predicción de la existencia de los quarks y gluones cuya observación directa nunca se ha realizado. Sin embargo, su existencia no está en duda porque las implicaciones de ella en el comportamiento de las diferentes interacciones es precisa y observable.

De igual manera tenemos a las partículas virtuales, necesarias para el cálculo de diversas interacciones entre partículas fundamentales. Su existencia no es verificable directamente de manera experimental, pero nuevamente, sus implicaciones sí lo son. Así que no es nada extraño suponer la existencia de objetos que nos permitan entender ciertos fenómenos que sin su existencia no podemos explicar. Eso lleva a la segunda observación: asumir que las cuerdas existen y que su longitud es muy pequeña debe ser compatible con lo observado.

Recordemos que una longitud pequeña implica una concentración de energía en un espacio muy pequeño. Para lograr interactuar con algo tan energético, necesitamos también tener mucha energía. Es decir, que los procesos en

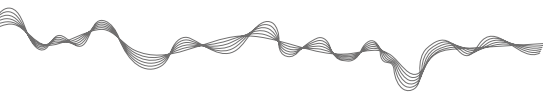


los que las cuerdas deberían ser importantes, relevantes para describir un fenómeno, son aquellos precisamente en los que la energía es muy alta y en los que la física cuántica es imprescindible. Esto es precisamente lo que esperamos de una teoría cuántica de gravedad.

Para comprender mejor qué significa gravedad cuántica, pensemos en lo siguiente: imaginemos un terreno cubierto de tierra y arena muy fina, hojas secas, piedras pequeñas y por ahí, por allá, piedras enormes, muy pesadas. Queremos entender cómo se comporta la arena, la tierra y las hojas. Basta que soplemos un poco y veremos diferentes efectos. Podemos pasarnos años estudiando eso. Pero algo nos llama la atención: que las hojas no se mueven mucho, las piedras casi nada y las enormes rocas mucho menos. Para poder entender cómo se mueven las hojas debemos interactuar con ellas con algo más fuerte que un simple soplo. Así que las empujamos con la mano, con el pie. Incluso prendemos una sopladora. Hemos aumentado la energía en nuestros experimentos. Pero para mover las grandes rocas, necesitamos aún más energía. Podemos desarrollar una teoría en torno a cómo se mueve todo en presencia de las inamovibles rocas. Pero lo que realmente queremos es entender de qué están hechas las rocas. Romperlas y ver cómo sus pequeñas partes chocan con la arena. Para ello necesitamos más energía y no lo conseguiremos simplemente aumentando la velocidad del viento. Requerimos de nuevas herramientas, de nuevas condiciones.

Algo así es la gravedad cuántica. No basta simplemente llevar y extrapolar nuestras teorías a energías más grandes donde la gravedad tenga un rol equivalente que las otras fuerzas, sino que es necesario modificar algo. Lo que antes nos servía, ya no lo hará.

La suposición de la existencia de cuerdas como objetos fundamentales, de longitud muy pequeña, concuerda con lo que esperamos para describir fenómenos cuánticos muy energéticos. Pero esta simple suposición es mucho más



rica de lo que aparenta. La primera implicación directa es que al tener una longitud muy pequeña (tan pequeña que si una cuerda tuviera un metro de longitud, el átomo sería del tamaño de una galaxia) su comportamiento está descrito por la mecánica cuántica.

Debido al principio de incertidumbre, una cuerda no puede estar en reposo. Cada parte de sí misma debe estar en movimiento. A eso le llamamos oscilación o vibración. Las cuerdas están caracterizadas por las frecuencias a las que vibran, pudiendo tener sus extremos fijos en diferentes puntos del espacio, libres o conectados. Las dos primeras posibilidades definen una cuerda que llamamos abierta, mientras que la tercera define una cuerda cerrada. La teoría de cuerdas puede tener ambos tipos de cuerdas (ver figura 14).

Tenemos entonces una propuesta que parte de la existencia de cuerdas de longitud muy pequeña que pueden vibrar a diferentes frecuencias. Vistas desde escalas mucho más grandes, la longitud debería sernos imperceptible, no así las frecuencias, pues éstas están relacionadas con su energía y otras etiquetas cuánticas. ¿Es eso compatible con lo que observamos? Sí. Hemos visto que tenemos un universo lleno de diferentes partículas a las que llamamos fundamentales y a las que no podemos asociar un tamaño. La teoría de cuerdas ofrece como punto de partida, la posibilidad de entender esta plétora de partículas como un mismo objeto: cuerdas fundamentales vibrando a diferentes frecuencias.

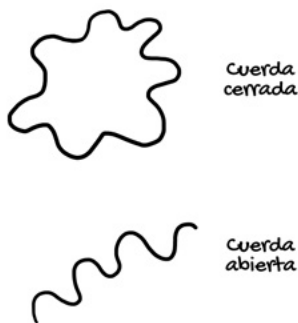
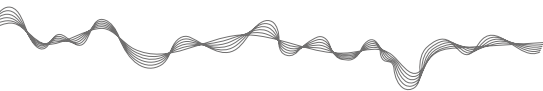


Figura 14. Hay dos tipo de cuerdas: cerradas y abiertas.

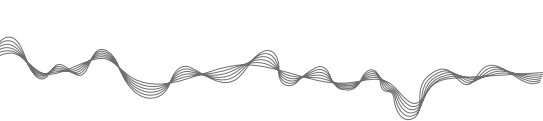


Pensemos en una cuerda cerrada. Al vibrar, longitudes de onda completa deben estar contenidas en la propia cuerda. Mientras más alta la frecuencia, más alta la energía asociada a la cuerda, y de acuerdo a la teoría de la relatividad especial de Einstein, más grande su masa. Así, una cuerda relativista cuántica posee una infinidad de estados con masas que comienzan en cero y se incrementan con la energía de vibración. Las masas (diferentes de cero) y sus respectivas energías son inversamente proporcionales a la longitud de la cuerda y como la longitud es asumida muy pequeña, los estados masivos de cuerdas vibrando tienen masas muy grandes, así que una buena primera aproximación de la dinámica de cuerdas es tomar únicamente los estados de masa cero. Pensando en términos de nuestra analogía, son los estados más ligeros, la tierra y la arena de nuestro terreno.

Pero aún no hemos dicho cómo conectamos estas cuerdas con lo que sabemos y hemos observado. Para ello es necesario darse cuenta cómo se comportan las cuerdas de masa cero y las diferentes vibraciones a las que pueden estar. En particular hay un tipo de vibración que se comporta de una manera muy interesante, aunque la palabra “interesante” puede quedarse corta. Se trata de una cuerda sin masa, cuya vibración especial le hace poseer un espín con valor dos. Se parece mucho a la partícula asociada con la gravedad, el gravitón. Pero para poder estar seguros de ellos, debemos de alguna manera obtener que en grandes cantidades describa en realidad una fuerza de gravedad. ¿Será así?

Si tomamos muchas de estas cuerdas, todas vibrando de igual manera, la teoría de cuerdas dice que la única manera consistente en que este montón de cuerdas puede existir, es si obedecen una regla, una ecuación. Esta regla surge de la propia naturaleza de las cuerdas (y de la suposición de que son objetos cuánticos y relativistas) y la deben satisfacer esas cuerdas de masa cero con esa vibración especial.

Asombrosamente, la regla que deben satisfacer es la misma que en 1916 propuso Albert Einstein para describir la gravedad como una manifestación de la curvatura del



espacio-tiempo. En otras palabras, este conjunto de cuerdas cerradas predice la existencia de una fuerza que debe estar regida por la relatividad general de Einstein, es decir, predice la existencia de la fuerza de gravedad. Ello supone toda una nueva manera de ver la física a altas energías, porque si pensamos que una sola cuerda tiene una naturaleza puramente cuántica, que en enormes cantidades curvan el espacio-tiempo y se manifiestan como la fuerza de gravedad, entonces dicha cuerda es en efecto el mensajero cuántico de la gravedad: el gravitón.

¿Cómo es que este gravitón, ahora identificado como una especial manera de vibrar de una cuerda cuántica, puede resolver los problemas de pensar en gravedad cuántica que anteriormente hemos descrito? Hagamos de nuevo un experimento en nuestra mente. Si ahora hacemos colisionar gravitones unos con otros, pero descritos a través de cuerdas cerradas (ver figura 15), vemos que aquello que nos impedía hacer cálculos sensatos ha desaparecido, pues la interacción entre gravitones no es más una interacción puntual, sino extendida en el espacio.

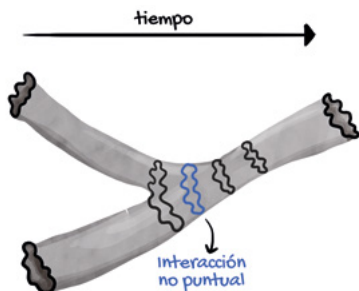
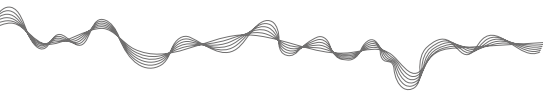


Figura 15. Interacción no puntual de dos cuerdas cerradas.

Al haber incertidumbre en la posición (igual a la longitud de la cuerda), por el principio de Heisenberg, la incertidumbre en el movimiento ya no es infinita y, por lo tanto, las probabilidades de colisiones de gravitones se vuelven finitas.

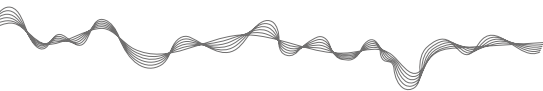


Tenemos finalmente una descripción cuántica de la gravedad que produce resultados finitos y que es compatible con la relatividad general de Einstein. Ello significó el inicio de la llamada primera revolución de la teoría de cuerdas, liderada entre los años 1970 y 1980 por Michael Green y John Schwarz.

Con la identificación del gravitón con una de las vibraciones cuánticas de una cuerda cerrada, se abrió toda una expectativa en la posible construcción, no solo de una teoría cuántica de la gravedad, sino de una teoría capaz de unificar todas las fuerzas de la naturaleza. Bajo esta perspectiva se comenzaron a estudiar las demás vibraciones de la cuerdas, al menos aquellas que no tuvieran masa. La idea general, construida como meta por quienes trabajaban en la formulación de la teoría, era que cada partícula que observamos, bosón o fermión, estuviera relacionada con vibraciones particulares de una cuerda. Así, habría un solo elemento fundamental cuya intensidad de interacción con otras cuerdas está dada en relación con su propio tamaño, es decir, es una propuesta en la que los mismos objetos fundamentales, de un solo tipo, establecieran las condiciones en la que la teoría fuese consistente.

Sin embargo, aún no hemos dicho nada sobre las demás vibraciones y la manera específica con la que se relacionan con las partículas conocidas. Por ejemplo, ¿qué vibración de la cuerda corresponde con un electrón? ¿o con un quark? ¿qué podemos explicar sobre el origen del universo al suponer que todo está formado de pequeñas cuerdas? ¿es esta propuesta consistente?

La idea general es que cada cuerda (estamos pensando en cuerdas cerradas) puede vibrar a diferentes frecuencias, todas ellas regidas por las reglas de la mecánica cuántica. Hay una infinidad de vibraciones, cuyas energías asociadas van creciendo. Así, en procesos muy energéticos es posible que altas vibraciones de cuerdas sean partícipes de ellos, pero a bajas energías, en la física que observamos, esperamos que solo influyan las vibraciones de menor energía, es decir, aquellas que no tienen asociada una masa. La escala de energía a la que se espera se manifiesten las vibraciones de la cuerda,

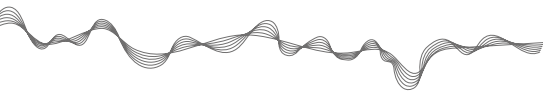


es inversamente proporcional a su longitud. Si asociamos la longitud de una cuerda a la longitud de Planck¹⁶, entonces se espera que los fenómenos relevantes de cuerdas sucedan a escalas energéticas 10 millones de veces más altas que las obtenidas en el Gran Colisionador de Hadrones en el CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire).

Por lo tanto, esperamos que las partículas que observamos en nuestro universo estén relacionadas con la vibración sin masa de alguna cuerda. Sin embargo, para poder tener una descripción igual de detallada que la que ofrece el modelo estándar de partículas, hace falta mucho más que la posibilidad de asociar una infinidad de partículas a las diferentes vibraciones de una cuerda fundamental.

Las consecuencias de postular la existencia de cuerdas como objetos fundamentales de la naturaleza son mucho más extensas que únicamente contar con una descripción cuántica de la gravedad. Antes de estudiar las posibles implicaciones y explicaciones de los diferentes fenómenos que observamos, veremos que la presencia de cuerdas cuánticas y relativistas restringe enormemente lo que podemos hacer con ellas.

¹⁶ La longitud de Planck, es la longitud más pequeña que puede construirse con las constantes fundamentales de la naturaleza, como la velocidad de la luz, la constante de Planck y la constante de Newton. Tiene un valor de una billón-trillonésima parte de un metro, esto es un punto decimal seguido de 35 ceros y un uno.



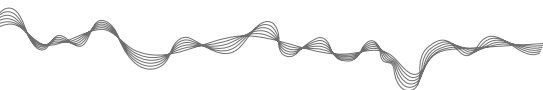
7. DE SUPERCUERDAS Y DIMENSIONES EXTRA

“En lo que concierne a las dimensiones extra, si estas son muy pequeñas no serían percibidas en la vida diaria, como tampoco lo son los átomos: vemos muchos átomos juntos pero no vemos átomos individuales.”

Edward Witten

Para lograr tener un modelo en el que las partículas se identifiquen con vibraciones de las cuerdas, debemos en primer lugar incorporar una simetría que creemos que es esencial en su descripción.

Para entenderla pensemos en lo siguiente. ¿Qué pasaría si bosones y fermiones fueran indistinguibles entre sí? Pensemos que cada partícula está representada por una esfera cuya mitad esta pintada de rojo representando a los bosones y la otra mitad es azul, representando a los fermiones. Mientras giramos la esfera podemos distinguir claramente si estamos viendo su “lado bosónico o fermiónico”. Consideremos una teoría de partículas elementales, donde algunas partículas se comportan como bosones y otras como fermiones. Si para cada partícula rotamos su esfera al otro lado, es decir, cambiamos los bosones por fermiones y a los fermiones por bosones, y las consecuencias físicas no son diferentes, decimos entonces que la teoría es simétrica ante esa rotación. Es una simetría tan poderosa que le llamamos supersimetría. Así, cada partícula debería tener una contraparte supersimétrica. Un electrón debería tener un



electrón bosónico, un fotón, que es un bosón, debería tener un compañero fermiónico. Es decir, si esta idea es correcta, las partículas o fluctuaciones de los campos deberían de ser el doble de las que hemos catalogado. Es importante mencionar que la supersimetría es compatible con la relatividad especial, por lo que no es extraño pensar que pueda formar parte de la naturaleza.

En nuestro mundo, el que observamos día a día, evidentemente no existe la supersimetría pues no hay evidencia experimental de esos compañeros supersimétricos. Es como si la esfera en nuestra analogía fuera lo demasiado pesada para hacerla girar. Pero a altas energías, deberíamos ser capaces de girarla y ver el lado oculto de la esfera supersimétrica. A medida que la energía baja, no es posible mantener el giro de esta pesada esfera, por lo que se estaciona en un lado, bosónico o fermiónico. Es en este sentido que decimos que la supersimetría debe estar “rota” a bajas energías (ver figura 16). Su existencia, sin embargo, es esencial en la construcción de una teoría consistente de cuerdas precisamente porque partimos de una teoría relativista

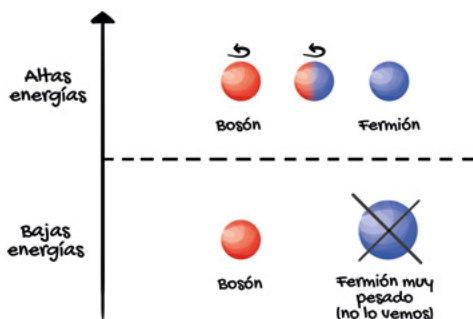
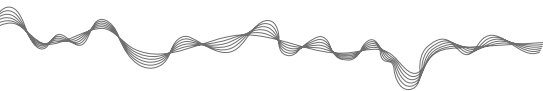


Figura 16. La supersimetría, de existir, se manifestaría a altas energías, mientras que a bajas estaría ausente. Esto se debe a que las compañeras supersimétricas de las partículas que observamos adquirirían masas muy grandes.

¿Qué pasa si ahora pensamos en un universo formado por cuerdas que poseen esta llamada supersimetría? ¿Y que ganamos con ello? Consideremos entonces una cuerda en la que la supersimetría sea parte de su naturaleza. Esto significa



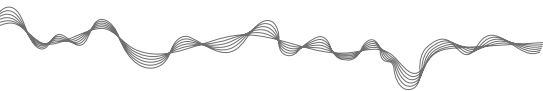
que cada punto que la conforma se comporta al mismo tiempo como un bosón y como un fermión. Así las vibraciones de las cuerdas podrán describirse como partículas que se comportan como bosones o como fermiones. Una cuerda con supersimetría es también llamada una supercuerda. A partir de aquí, solo nos referiremos a cuerdas que sean supercuerdas.

¿Qué significa que cada punto de la cuerda se comporte como bosón o fermión? A grandes rasgos significa que requerimos del mismo número de información, de datos para determinar de manera unívoca tanto su parte bosónica como su parte fermiónica. Para que ese número sea el mismo para describir las vibraciones cuánticas que dan origen a bosones y fermiones, la dimensión del espacio-tiempo en la que viven las cuerdas, es decir, en el número de coordenadas espaciales que tenemos (solo hay una coordenada temporal al ser cuerdas relativistas) no puede ser arbitraria. La teoría de cuerdas nos da su primera predicción: el espacio-tiempo tiene diez dimensiones¹⁷.

A primera vista, esto parece una locura. ¿Cómo podemos aceptar esta idea si “claramente” vemos que sólo hay tres dimensiones espaciales y una temporal? Parecería que hemos llegado al callejón sin salida y podemos vernos tentados a renunciar a este modelo y quedarnos con nuestra colección de puntos, aunque nunca estemos seguros de que lo sean.

La otra opción es continuar y enfrentar la posibilidad de que las dimensiones que vemos no son todas y que existen algunas que son tan pequeñas que no influyen de manera directa en nuestro mundo; después de todo, aunque estamos ante la predicción de algo que no observamos, ahora sabemos que no debemos descartar la idea simplemente por el hecho de que no hemos visto lo que se predice. Ya nos ha pasado con los neutrinos y con los quarks. Nosotros elegiremos esta opción. No es una elección arbitraria, sino motivada porque nuestro modelo de puntos no tiene manera de responder ciertas preguntas.

¹⁷ Para una descripción más técnica sobre la razón de tener 10 dimensiones, véase el Apéndice 1.

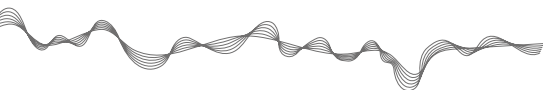


En nuestro viaje en este universo de cuerdas trataremos de entender cómo la presencia de más dimensiones puede ayudar a responder algunas de las más inquietantes preguntas en torno a la naturaleza del universo y veremos cómo es posible aceptar que solo vemos algunas de ellas y no las demás.

Comencemos imaginando que vivimos en un universo de solo dos dimensiones espaciales. Esto es como vivir en una hoja de papel. Podemos imaginar toda una serie de acontecimientos sobre esa hoja, seres bi-dimensionales que interactúan unos con otros sin necesidad de recurrir a una tercera dimensión, hasta que alguien que habita las tres dimensiones derrama una pequeña gota de agua sobre la hoja de papel. Para los seres bi-dimensionales, en lugar de que la gota se disperse totalmente por la superficie, como esperarían, esta desaparece gradualmente. ¿Qué pasó? Más allá de una posible serie de explicaciones basadas en la física bi-dimensional, existe una respuesta clara y contundente al fenómeno observado. La hoja de papel tiene un ancho y el agua se absorbió a través de ese ancho (recordemos que la gota es muy pequeña). Los seres bi-dimensionales han encontrado una razón para inferir que existe una dimensión extra a las que ellos observan con los fenómenos que a diario experimentan, pero que esta es muy pequeña para ser vista en el día a día. Sin embargo, las consecuencias de su existencia pueden llevar a la explicación de fenómenos como la absorción de la gota (que ellos observan simplemente como una desaparición del agua sin que haya evaporación) que de otra manera sería muy difícil de explicar.

¿Pasará lo mismo con las dimensiones extra que predice la teoría de cuerdas y con ciertos fenómenos que observamos en el universo, quizá a muy altas energías?

Un primer intento con este objetivo fue estudiado por Oscar Klein y Theodore Kaluza a principios del siglo XX. La idea es la siguiente: supongamos que el espacio tiene en realidad cuatro dimensiones espaciales y una temporal, pero la cuarta dimensión espacial está enrollada en un círculo, tan pequeño, que escapa a nuestra detección con la energía con la que hacemos los experimentos. Recordemos que la energía es una



forma de hablar del tamaño de las cosas, así que si hacemos experimentos con objetos grandes como pelotas, estamos usando una energía muy pequeña. Entonces, si la cuarta dimensión es muy pequeña, no podremos verla ni percibirla.

Una dimensión muy pequeña no puede extenderse indefinidamente en distancia, de otra manera seríamos capaces de observarla, por lo que es necesario que tenga una geometría capaz de parecer inexistente a distancias muy grandes. Esto pasa por ejemplo con los cables de luz que vemos a lo lejos, en el paisaje mientras viajamos por una carretera. A esa distancia parecen simples líneas, pero si nos acercáramos lo suficiente, veríamos que en realidad son cilindros. Hay una dirección del espacio por la que es posible moverse, su anchura, que resulta ser minúscula si le observa desde muy lejos. Lo mismo pasa con la dimensión extra y lo mas sencillo es visualizarla como un círculo.

Así, en cada punto de nuestro espacio hay un círculo. Este círculo puede cambiar de forma, quizá en unos puntos sea un círculo perfecto, en otros parecerá más bien un lazo amorfo, incluso torcido (ver figura 17). La geometría de la dimensión extra estará cambiando de punto a punto. ¿Qué percibe alguien que no ve la cuarta dimensión, en su universo de tres dimensiones espaciales? Verá que existe algo que se transforma pero que no es debido a ningún cambio en la geometría de su propio universo tridimensional.

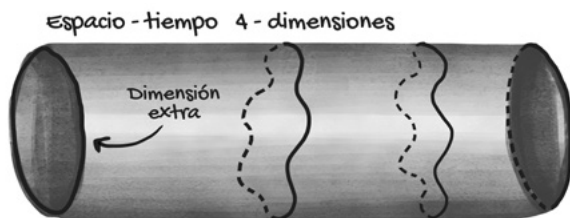
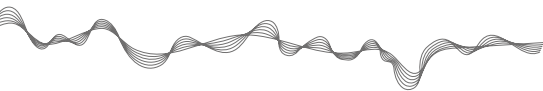


Figura 17. En un universo con una dimensión extra, pequeña y enrollada, esquematizada como un círculo en la imagen, la forma de este podría cambiar en diferentes puntos del universo en que vivimos (la línea recta en la imagen).

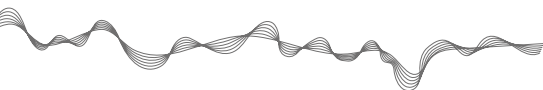


Estos cambios se conocen como simetrías “internas” y describen precisamente a fuerzas como la electromagnética o las nucleares débil y fuerte. Como la geometría, de acuerdo a la teoría general de la relatividad de Einstein, es una manifestación de la gravedad, Kaluza y Klein concluyeron que la gravedad en un universo espacio-temporal de cinco dimensiones ¡se manifiesta en cuatro dimensiones como una teoría de gravedad y una teoría electromagnética!

La razón por la que la idea de Kaluza-Klein no prosperó fue a grandes rasgos debido a la ausencia de la mecánica cuántica. Dicho de esa manera uno podría preguntarse si vale la pena retomar la idea de tener dimensiones extra en una propuesta compatible con la mecánica cuántica. Eso es precisamente lo que indica la teoría de cuerdas, que como hemos visto, está basada en una formulación cuántica de las cuerdas como objetos fundamentales.

En teoría de cuerdas, las seis dimensiones extras son también tan pequeñas que escapan a nuestra detección directa, pero cuya existencia se espera tenga consecuencias que permitan responder interrogantes abiertas. La pequeñez del espacio de dimensiones extra significa que su volumen es más pequeño que el tamaño de las estructuras más diminutas que hayamos visto (por ejemplo, con el experimento LIGO para la observación de ondas gravitacionales, se pueden medir cambios en el espacio referentes a una cien mil billonésima parte de un metro). En cada punto de nuestro espacio, de ser correcta la predicción, hay un universo que hemos ignorado. Veamos qué consecuencias tiene suponer su existencia.

Nuestra primera observación es que las cuerdas pueden moverse a través del espacio de dimensiones extra, pues las propias cuerdas son aún más pequeñas que este espacio. Así, las cuerdas pueden moverse en el espacio extendido en donde nosotros habitamos y también en el espacio de dimensiones extra, estableciendo un flujo de cuerdas que transmiten información de un espacio al otro. Lo que suceda en las dimensiones extra, puede (y tiene) repercusiones en las propiedades físicas del universo que observamos. Pero hay



una en particular que llama la atención y que es exclusiva de la presencia de cuerdas.

A diferencia de las partículas puntuales, una cuerda puede estirarse y enrollarse alrededor de ciertas regiones de las dimensiones extra. Esto hace que una teoría con dimensiones extra, en donde los objetos fundamentales son partículas, sea muy diferente a una teoría en donde tengamos a las cuerdas como los bloques primarios de todo (ver figura 18).

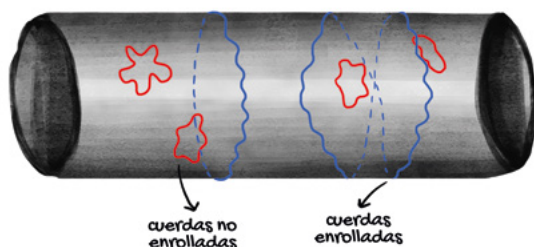
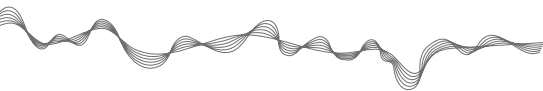


Figura 18. En presencia de dimensiones extra compactas, como un círculo, las cuerdas pueden estirarse y enrollarse, dando lugar a nuevas contribuciones en energía provenientes de su tensión.

Una cuerda enrollada se comporta de manera diferente a una cuerda que se propaga por las dimensiones extendidas. Recordemos que la energía con la que vibran las cuerdas establecen las propiedades de la partícula que les asociamos. Una cuerda que se extiende a lo largo de las dimensiones extra, tiene una tensión añadida, pues las dimensiones extra son más grandes que una cuerda relajada. Si el tamaño de la dimensión extra es muy grande, su contribución a la masa por la tensión de la cuerda, también lo es. Por el contrario, la cantidad de movimiento a lo largo de esa dirección se vuelve muy pequeña.

Así, la masa-energía atribuida a la vibración de la cuerda recibe tres contribuciones: su vibración, su cantidad de movimiento y qué tanto está enrollada en alguna o varias de las dimensiones extra. Al número de veces que esté enrollada, se le llama número de enrollamiento. Si la tensión de la cuerda



al estirarse y enrollarse en cierta dirección aumenta mucho, la cuerda puede romperse y liberar cuerdas no enrolladas.

¿Hay diferentes maneras de enrollar una cuerda en las dimensiones extra? Si, todo depende precisamente de la geometría del espacio de seis dimensiones y de características particulares como si tiene hoyos, tal como una dona o toro. Si pensamos que cada dirección de las dimensiones extra se compacta a un círculo de radio R , podemos enrollar las cuerdas precisamente alrededor de cada uno de esos círculos (ver figura 19). ¿Qué observa alguien en el espacio-tiempo extendido de cuatro dimensiones, cuando hay cuerdas enrolladas en esas direcciones en particular?

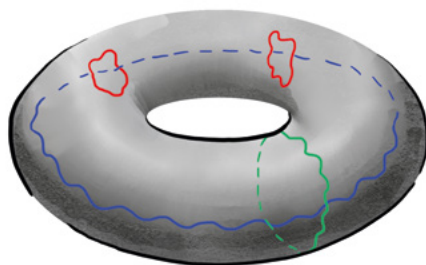


Figura 19. Espacio de dos dimensiones extra compactas en donde las cuerdas cerradas pueden moverse y enrollarse en cualquiera de sus dos direcciones. Se extiende esta misma idea para imaginar las seis dimensiones extra predichas por la teoría de cuerdas.

En cuatro-dimensiones se observará una partícula de cierta masa, construida por las tres contribuciones mencionadas y con cierta energía. Y aquí viene una consecuencia única a la existencia de cuerdas. Si intercambiamos el número de enrollamiento por la cantidad de movimiento, no en un círculo de radio R , sino en uno de radio inverso, es decir, $1/R$, la masa de la partícula asociada es exactamente la misma. Esto significa que quienes observemos a estas cuerdas en el espacio de cuatro dimensiones, no podemos saber exactamente cuál de los dos escenarios es el que realmente está sucediendo. Como ambas situaciones son indistinguibles, decimos que tenemos una dualidad, llamada dualidad T , obtenida por la propia existencia de las cuerdas en dimensiones extra.

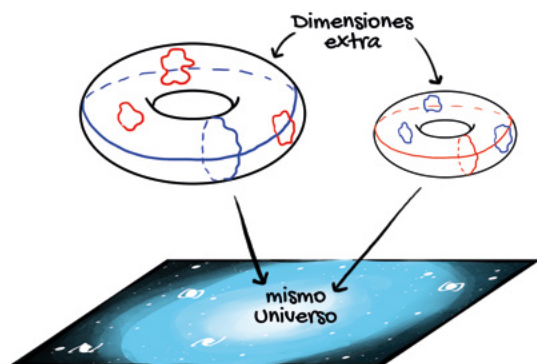
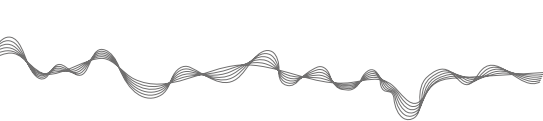


Figura 20. Dualidad T. Las vibraciones de las cuerdas que provienen de tener dimensiones compactas en círculos de radio R son indistinguibles de aquellas provenientes al compactar en círculos de radio inverso $1/R$.

La existencia de la dualidad T nos dice mucho sobre cómo una cuerda percibe el espacio tiempo. Para una cuerda un espacio enrollado muy grande (R grande) es exactamente igual a un espacio muy chico ($1/R$ es muy pequeño si R es grande). Por lo tanto, hay un tamaño mínimo que la cuerda percibe pues en espacios más pequeños, el tipo de comportamiento de la cuerda es exactamente el mismo que para espacios grandes, haciendo irrelevante su descripción para valores de R muy pequeños. Esto tiene todo el sentido del mundo, pues al ser la cuerda el objeto fundamental, no percibe tamaños más pequeños que ella misma (ver figura 20).

El enrollamiento de cuerdas también tiene otras consecuencias. Como hemos dicho, una cuerda enrollada debe estirarse, tener tensión. Esta energía de enrollamiento hace que la geometría del espacio de dimensiones extra se modifique. Después de todo, estirar una cuerda en un espacio y tensionarla debe influir en la forma del espacio de las dimensiones extra. Es como enrollar una liga alrededor de una figura de arcilla. La energía de tensión de la cuerda modifica la geometría del espacio (ver figura 21). Decimos entonces que el espacio interno reacciona ante la energía de las cuerdas. ¿Cómo se manifiestan en nuestro universo de cuatro-



dimensiones grandes todos esos cambios geométricos? Si el espacio de dimensiones extra cambia su forma con el paso del tiempo, ¿podremos percibirlo de alguna manera?

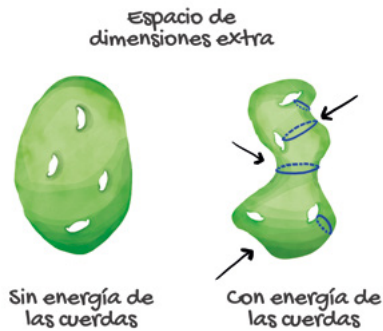
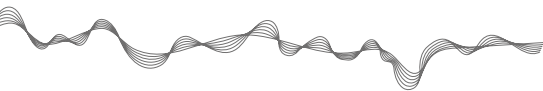


Figura 21. La energía proveniente de las vibraciones de las cuerdas que viven en las dimensiones extra modifican la geometría de los espacios compactos.



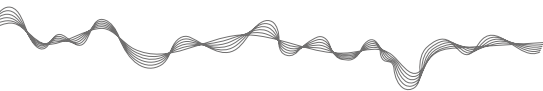
8. MÁS QUE SOLO CUERDAS

“Había estado conviviendo con D-branas por ocho años, pero nunca tomándolas muy en serio...pero para casi cualquier otra persona, eran un nuevo objeto: la teoría de cuerdas no es más que solo cuerdas, también contiene D-branas.”

Joseph Polchinski, *Memorias de un físico teórico*

Los argumentos que hemos planteado para proponer un modelo en el que todo esté formado por cuerdas y no por objetos puntuales, son los mismos que nos llevarían a plantearnos la existencia de objetos fundamentales con más dimensiones. Si el punto no existe, es entonces lógico descartar la existencia de objetos con alguna anchura nula. ¿No es de esperar, bajo estas ideas, que todo objeto debe tener todas las dimensiones posibles del espacio en el que vive? En nuestro caso debería haber objetos fundamentales con tres dimensiones, como esferas o donas o cualquier otra cosa que se nos ocurra. Así que un modelo completo debería tener como aproximación la existencia de cuerdas, membranas y de manera fundamental, objetos de tres dimensiones (con volumen).

Como hemos visto, un modelo a base de cuerdas no puede tener solo tres dimensiones espaciales y una temporal, sino nueve espaciales y una temporal. En un modelo con nueve dimensiones espaciales, donde las cuerdas son los objetos fundamentales, es también necesaria la presencia de otros objetos con diferentes dimensiones, membranas de dos dimensiones



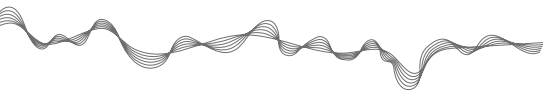
(que llamaremos 2-branas), membranas de tres dimensiones (que llamaremos 3-branas), 4-branas, etc.

Cada una de las membranas de dimensión menor a nueve debería por lo tanto tener un “ancho”. Por ejemplo, una membrana o 2-brana, debería tener siete dimensiones más. Estas dimensiones son muy pequeñas comparadas con las dos dimensiones que definen a la membrana, pero deberían existir.

En 1993, Joe Polchinski, físico estadounidense, probó que la propia teoría de cuerdas, predecía por sí misma la existencia de este tipo de objetos. Para entenderlo, recordemos que una cuerda cerrada vibra en frecuencias diferentes debido a su naturaleza cuántica. Una de esas vibraciones corresponde al gravitón, pero hay otras vibraciones diferentes que definen de igual manera la dinámica y el aporte energético de la cuerda al espacio en el que se encuentra. Estas vibraciones, al igual que el gravitón, se pueden interpretar como partículas, en este caso de espín uno, con características muy bien definidas que resultan ser generalizaciones de campos como el electromagnético.

Al comportarse como campos electromagnéticos, es de esperar que existan objetos que reaccionen a su presencia, como el electrón reacciona si existe un campo eléctrico en el que se encuentre inmerso. En otras palabras, es de esperar que existan objetos que posean carga respecto a los campos de vibración de la cuerda cerrada. Aquí entendemos por “carga” una propiedad intrínseca a esos objetos que los hace cambiar su estado de movimiento en presencia de los campos creados por las vibraciones cuánticas de la cuerda cerrada. Para referirnos a ellos de manera concreta, les llamamos “campos de Ramond-Ramond” o simplemente campos RR, en honor al físico franco-estadounidense Pierre Ramond, quien junto a André Neveu y John Schwarz, de nacionalidad francesa y estadounidense respectivamente, desarrollaron la teoría de supercuerdas en la década de 1970.

Joe Polchinski encontró no solo cómo describir dichos objetos, sino que además se percató de una profunda relación entre ellos y las cuerdas. Básicamente se dio cuenta que



estos objetos, a los que llamó Dp-branas (membranas de p dimensiones espaciales), deberían ser muy pesados en comparación con las cuerdas. Al ser tan pesados, no podemos darles un poco de energía y ver cómo se comportan, porque prácticamente no les pasa nada. Para ver su dinámica, debemos transferirles mucha energía. Para entender esto, pensemos nuevamente en la analogía que usamos para adentrarnos al mundo de la gravedad cuántica, en un campo lleno de hojas secas.

Las hojas son tan ligeras que un simple viento las mueve, no mucho, solo un poco de dónde estaban al principio. Eso es lo que sabemos hacer muy bien en física. Ver cómo se mueven las cosas “solo un poco”. Ahora imaginemos que en medio de ese campo lleno de hojas secas colocamos una campana de hierro, muy pesada. Si hacemos correr un viento ligero veremos a las hojas flotar, pero la campana no sufrirá ningún efecto visible. ¿Cómo podemos saber qué propiedades tiene? Quizá si lanzamos un gran huracán, podemos moverla un poco, pero el precio que pagamos es que perdemos cualquier manera de seguir entendiendo el movimiento de las hojas secas, pues en presencia del huracán, las hojas volarán mucho más lejos del lugar en donde estaban y no tendremos control de su movimiento.

Esto mismo pasa con las D-branas y las cuerdas. La energía típica que posee una cuerda es mucho menor que la que necesitamos para mover a una D-brana. Sin embargo, al igual que la campana en el campo, podemos encontrar otra manera de conocer de qué está hecha. No necesitamos destruirla o moverla con el viento. Basta que le peguemos y producirá un sonido de vibración. Las vibraciones de la campana nos pueden dar mucha información sobre su estructura y naturaleza. Y aquí viene otra de las hermosas cosas que caracterizan a la teoría de cuerdas. Polchinski encontró que una D-brana, al ser igualmente un objeto cuántico, no tiene energía cero y esa energía puede calcularse porque la D-brana vibra a través de cuerdas abiertas cuyos extremos están confinados a la D-brana. Cada “golpe” que recibe la D-brana la excita a través de cuerdas abiertas (ver figura 22).

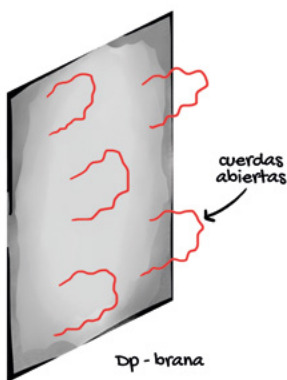
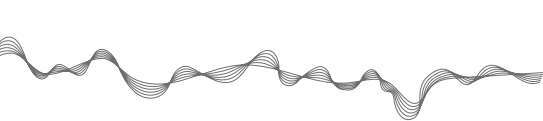


Figura 22. Las D_p -branas son objetos de p dimensiones espaciales (donde p es un número), que pueden curvarse y tener dinámica. Sobre su superficie se mueven libremente los extremos de cuerdas abiertas.

Así, una D-brana puede entenderse como el lugar, con cualquier dimensión entre 0 y 9, en donde los extremos de las cuerdas abiertas pueden moverse libremente. Si esos extremos llegan a unirse, la cuerda abierta se convierte en una cuerda cerrada. Al no estar vinculada a la D-brana, puede escapar de ella. Pero recordemos que la cuerda cerrada vibra de tal manera que transmite la fuerza de gravedad a través de gravitones. Por lo tanto, podemos concluir que las D-branas emiten y absorben gravitones (los absorben si pensamos en el mecanismo anterior a la inversa, es decir, una cuerda cerrada se aproxima a la D-brana, se rompe, y sus extremos se anclan a la D-brana). Esto es compatible con el hecho de que son pesadas y por lo tanto deben deformar el espacio-tiempo.

Dos D-branas en iguales condiciones y separadas por una distancia dada, experimentarán una fuerza de atracción gravitacional debido a su masa, pero como la vibración de las cuerdas cerradas que emiten también crean los campos RR bajo los cuales las D-branas están cargadas, también sentirán una fuerza de repulsión. Como ambas fuerzas provienen de las vibraciones cuánticas de la cuerda cerrada, se puede calcular que ambas tienen igual valor, por lo que la fuerza total entre dos D-branas es cero. Esto es consecuencia de su naturaleza supersimétrica (ver figura 23).

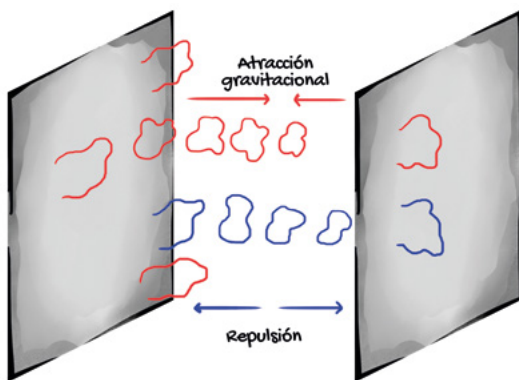
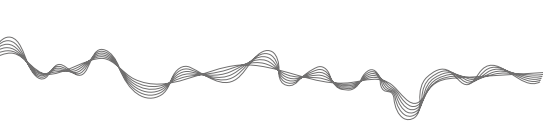
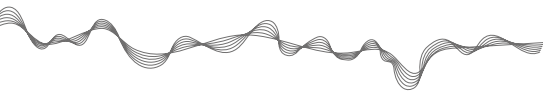


Figura 23. Las D-branas están cargadas ante los campos de fuerza provenientes de las vibraciones de las cuerdas cerradas. Al tener la misma carga, existe una repulsión entre ellas que, sin embargo, se ve cancelada por la atracción gravitacional que experimentan.

Hasta ahora hemos descrito las vibraciones de las cuerdas cerradas, pero poco hemos dicho de las asociadas a cuerdas abiertas, precisamente como las que se encuentran confinadas a las D-branas. ¿Qué información obtenemos de ellas? ¿cómo vibran? La respuesta ilustra de una manera muy bonita la posibilidad de tener una descripción unificada de la naturaleza, es decir, de poder describir todas las fuerzas de la naturaleza a través de un mismo principio, en este caso de la supercuerda cuántica y relativista. Aclaremos esto. Habíamos mencionado que además de la fuerza de gravedad, existen fuerzas como la electromagnética, y las subatómicas, como las fuerzas débil y fuerte. Resulta que en el contexto de la teoría de cuerdas, estas fuerzas surgen de manera natural como la vibración más baja, la de masa nula, de una cuerda abierta.

Así, la excitación de una D-brana (lo que comparamos como golpear a una campana) da origen a diferentes fuerzas dependiendo de la configuración de D-branas que tengamos y de sus dimensiones, es decir, la dinámica de las D-branas se entiende como una teoría de fuerzas del tipo electromagnético, fuerte y débil en las dimensiones espaciales en las que está extendida la D-brana. Cada golpe que le damos a la D-brana para saber de qué está hecha, pone a vibrar a un montón de



cuerdas abiertas y vibran creando los campos mensajeros de las fuerzas mencionadas.

El número de D-branas determina cómo se comportan los campos de la cuerda abierta. Si tenemos una sola D-brana, la teoría es muy parecida al electromagnetismo. Si tenemos dos, las cuerdas abiertas vibran como si se tratara de la teoría débil, mientras que tres D-branas emulan la teoría que describe a la fuerza fuerte. Dado que la vibración de la cuerda abierta induce un movimiento de los extremos, podemos decir que los extremos son como partículas que actúan en respuesta de los campos que la misma cuerda abierta crea. Así, concluimos, los extremos son como partículas cargadas ante esos campos, como quarks o electrones.

La existencia de las D-branas en la teoría de cuerdas permite entender a las cuatro fuerzas existentes y además nos permite establecer un origen común a todas. La fuerza de gravedad proviene de las cuerdas cerradas, mientras que las teorías electromagnética, débil y fuerte, de las cuerdas abiertas. En principio, la interacción de cuerdas cerradas con cuerdas abiertas nos permite describir de igual manera las interacciones de las diferentes partículas asociadas, es decir, que a través de la interacción de una cuerda cerrada con una abierta, podemos describir y reproducir la interacción entre partículas con carga, que son fermiones, con los mensajeros de las fuerzas, que son bosones.

Sin embargo, sabemos que ciertas partículas sienten solo algunas fuerzas, no todas, y otras como los quarks, parecen reaccionar ante todas. ¿Cómo obtenemos eso de un modelo de cuerdas y D-branas? Pues como hemos dicho, las partículas que sienten las fuerzas son los extremos de las cuerdas abiertas. Pero las cuerdas abiertas tienen dos extremos. Si ambos viven en la misma D-brana, las cuerdas vibrantes se comportan como partículas mensajeras de las fuerzas, mientras que cuerdas que conectan diferentes D-branas, se comportarán como partículas que responden a las fuerzas que viven en ambas D-branas.

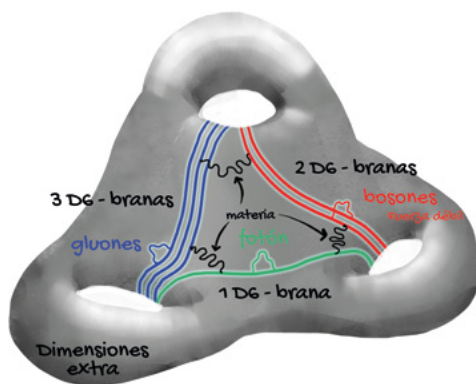
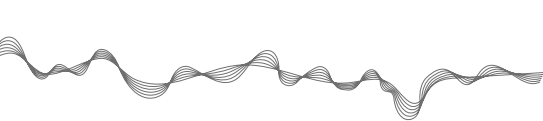
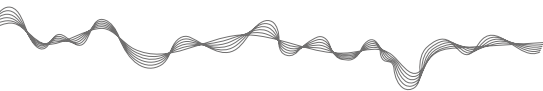


Figura 24. Obtención cualitativa del modelo estándar de partículas por el enrollamiento de D-branas en las dimensiones extra.

Así, es posible reproducir el modelo estándar de partículas en su forma cualitativa (esto significa que podemos reproducir cosas genéricas, pero no particulares) al enrollar tres tipos de D-branas en las dimensiones extra (ver figura 24).

En el espacio de cuatro-dimensiones, veríamos que existen diferentes partículas con diferentes propiedades, relacionadas con los diferentes tipos de cuerdas entre las D-branas. Por ejemplo, consideremos tres tipos de D6-branas (D-branas con seis dimensiones espaciales) enrolladas en tres direcciones del espacio de dimensiones extra y extendida en las tres dimensiones de nuestro universo. Cada conjunto está enrollado en una zona diferente del espacio interno. Digamos que en el primer conjunto hay tres D6-branas, en el segundo hay dos y en el tercero solo una. Una cuerda abierta puede tener ambos extremos en un mismo o en diferentes conjuntos. Si ambos extremos están en el mismo conjunto, la cuerda tiene nueve, cuatro y un diferentes formas de enlazarse para cada caso. Estos se interpretan como ocho gluones, tres bosones (fuerza débil) y un fotón, además de fotones extra (sí, tenemos problemas).

Cada cuerda abierta que se conecta a diferentes grupos corresponderá a una partícula que reaccionará a las partículas



portadoras de la fuerza, correspondiente a las cuerdas conectadas al mismo conjunto. Así, una cuerda que conecte el primer conjunto con el segundo, será una partícula cargada ante la fuerza fuerte y la débil. Estos serán interpretados como un tipo de quark. También los habrá provenientes de la cuerda que conecta al primer grupo con el tercero. Estos no sentirán la fuerza débil. Los electrones provendrían de cuerdas que enlazan el segundo con el primer grupo, y así sucesivamente.

El origen cualitativo de las diferentes partículas y de sus interacciones parece tener un origen común en teoría de cuerdas. Estudios más recientes han mostrado que las simetrías de la teoría de cuerdas parecen contener de manera natural un conjunto de cuerdas que se comporten como las partículas del modelo estándar. Pero la idea de ir a una propuesta que difiera de lo asumido en las teorías que sabemos que funcionan para describir a la naturaleza, como lo es el modelo estándar de partículas, no es solo reproducir lo que ya sabemos, sino responder a interrogantes para las cuales no tenemos respuesta o no parece haber una explicación robusta.

Ni el modelo estándar de partículas, ni la relatividad general de Einstein, pueden responder a preguntas que denominamos más “estéticas”, pues si bien no están motivadas por una discrepancia en la observación, si están directamente relacionadas con la manera en que hemos desarrollado nuestras teorías suponiendo un principio reduccionista.

Como ejemplo de ello tenemos el hecho de que solo existen tres familias de partículas (¿por qué no hay más o menos?), o que precisamente una teoría como el modelo estándar sea consistente matemáticamente, cuando hay una infinidad de posibilidades dentro de la teoría cuántica de campos de construir muchos más modelos que no lo sean. Otro tipo de preguntas que surgen son ¿por qué hay tres dimensiones espaciales? ¿por qué la gravedad es más débil que las otras fuerzas? ¿por qué no hay más fuerzas que la electromagnética, la débil y la fuerte? ¿por qué sólo hay una fuerza de gravedad y no otras? ¿por qué parece no haber una fuerza que sea transmitida por una partícula de espín cero?



Desde la perspectiva de teoría de cuerdas, es posible responder a esas preguntas. Existen modelos en los que el número de familias del modelo estándar se puede reproducir de las propiedades geométricas y topológicas de los espacios de dimensión extra. Por propiedades topológicas nos referimos a propiedades del espacio que no cambian, aunque lo deformemos. Pensemos en un objeto hecho de arcilla o goma y que la única regla sea que no podemos romperlo o pegarlo. Así, si nos dan una bola, podemos deformarla a un disco de cierta anchura y topológicamente seguimos teniendo el mismo espacio. Lo mismo pasa con el número de hoyos. Pensemos en el clásico ejemplo que emociona a físicos y matemáticos: una dona es topológicamente igual a una taza (con la cual acompañar a esa dona si la llenamos de café), pues podemos deformar una en la otra (ver figura 25).

Regresando a nuestro caso, si el espacio de dimensiones extra, por ejemplo, tiene tres hoyos, existen modelos que relacionan directamente ese número de hoyos, esa propiedad topológica, con el número de familias en el modelo estándar, es decir, podemos explicar el número de familias por la elección de un espacio de dimensiones extra con propiedades topológicas determinadas.

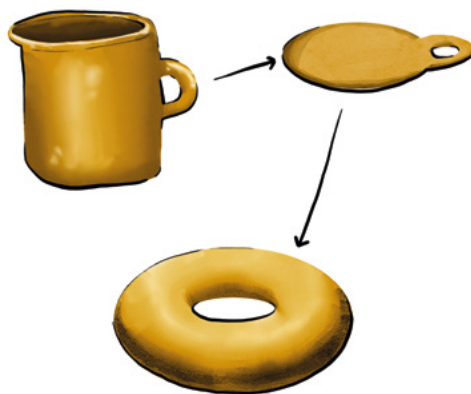


Figura 25. Dado que podemos deformar una taza en una dona, decimos que ambas son topológicamente equivalentes.

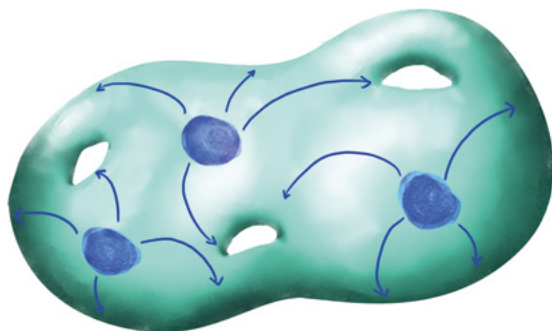
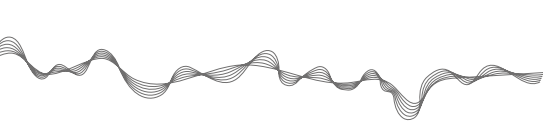
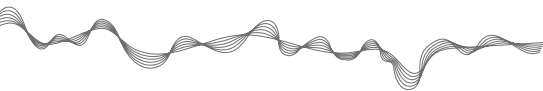


Figura 26. Las cargas en un espacio compacto deben anularse, porque las líneas de flujo “no tienen a dónde ir”.

De igual manera, como las dimensiones extra son pequeñas, no podemos tener cargas aisladas ahí pues las líneas de flujo no tendrían a dónde ir (ver figura 26), por lo que es necesario que se cancelen las cargas de los campos RR debidas a las D-branas, de la misma manera que las cargas eléctricas abandonan a un conductor conectado a tierra. En el modelo particular que hemos descrito sobre curvar D6-branas, la carga total de campos RR debe anularse. Eso lleva directamente a la construcción de un modelo en cuatro-dimensiones libre de anomalías, como lo es el modelo estándar. Una anomalía es una simetría de la teoría que no sobrevive a su versión cuántica. A veces esas anomalías son malas porque implican que la teoría dependa de características de las cuales no debería depender (por ejemplo, podríamos tener diferentes teoría de cuerdas solo por el hecho de rotarlas, lo cual es ciertamente inverosímil). Vemos así que preguntas que escapan al rango de respuesta de la teoría de campos cuántica, pueden responderse geoméricamente y de manera sencilla en el lenguaje de cuerdas.

Existe una última consecuencia de la existencia de las D-branas y es sobre la posibilidad de que exista una más estrecha relación entre las teorías de fuerzas provenientes de



las cuerdas abiertas y la gravedad de las cuerdas cerradas y que fue descubierta en 1997 por el físico argentino Juan Maldacena.

Básicamente consiste en lo siguiente. Hemos visto que al tener diferente número de D3-branas, podemos generar diferentes tipos de fuerzas. ¿Qué pasa si el número de D3-branas que se encuentra apilada es muy grande? ¿cómo es la fuerza correspondiente?

Un número muy grande de D3-branas es en conjunto un objeto muy, pero muy pesado. Excitarlo será muy difícil (¡ya no se trata de golpear una campana, sino de golpear una montaña!). En ese sentido estaríamos estudiando una teoría de fuerzas difícilmente perturbable y a la que llamamos una teoría no-perturbativa, lo que significa que no podemos aproximarla como lo hacemos con otras teorías como la electromagnética.

Por otro lado, si tenemos un número grande de D3-branas en el espacio de diez dimensiones, al ser las D-branas muy pesadas, deberán deformar el espacio-tiempo a su alrededor y esa deformación se manifiesta precisamente como una teoría de gravedad alrededor de las D3-branas.

Como ambas manifestaciones, gravedad y fuerzas de las cuerdas abiertas provienen de la misma fuente (las D3-branas), se encontró que hay una equivalencia directa entre ellas. Sin entrar a los detalles de la construcción, el resultado específico parece indicar que la gravedad en un espacio externo, pero limitado por las D3-branas puede traducirse a una teoría del tipo electromagnético sobre las D3-branas o sobre la frontera que limita al espacio curvado. Por lo tanto, basta entender la dinámica de las teorías de fuerzas del tipo electromagnético en un espacio, por ejemplo, de tres dimensiones, para entender la gravedad en un espacio-tiempo de cuatro. Esto parece decirnos que la gravedad y las fuerzas como el electromagnetismo, la débil y la fuerte, se relacionan como en un holograma, por lo que la propuesta se denomina precisamente como holografía o conjetura de Maldacena (figura 27).

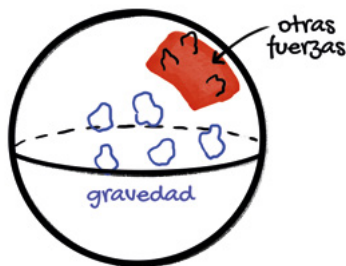
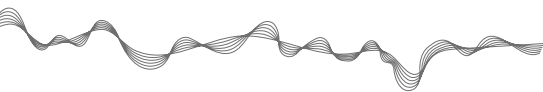
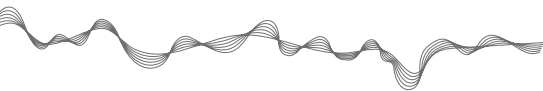


Figura 27. La fuerza de gravedad, o equivalentemente la geometría de un espacio, es equivalente a la dinámica de fuerzas del tipo electromagnético o nucleares en la frontera de ese espacio. A esto se le conoce como la holografía en teoría de cuerdas.

Finalmente, la existencia de D-branas también está relacionada con la física de los hoyos negros. Una manera de construir hoyos negros a través de las D-branas es curvando estas en regiones de las variedades extra. Como las dimensiones en las que están curvadas las D-branas no se observan en el espacio-tiempo de cuatro dimensiones, veríamos un objeto muy pesado, deformando el espacio-tiempo a su alrededor de la misma manera en que lo hace un hoyo negro. Como las D-branas tienen también cargas respecto a campos de vibración de la cuerda cerrada, los hoyos negros originados por D-branas, también tendrían cargas. A este tipo de objetos se les conoce como hoyos negros supersimétricos y, a pesar de que son objetos puramente matemáticos y teóricos, han sido muy útiles para avanzar en nuestro entendimiento sobre el origen microscópico de la entropía de hoyos negros.

La existencia de las D-branas en el contexto de la teoría de cuerdas permitió resolver una aparente contradicción entre la forma de construir una teoría de cuerdas consistente y la idea de tener una sola teoría que describiera las cuatro interacciones conocidas. Al inicio de la primera revolución de cuerdas, motivados por el trabajo de Green y Schwarz, varios grupos en todo el mundo se propusieron buscar maneras diferentes de hacer una teoría de cuerdas. Dejando los detalles de la construcción a un lado, el resultado fue que había (al menos)



cinco diferentes teorías de cuerdas. La que hemos descrito son en realidad dos diferentes teorías, llamadas Tipo II, construidas por únicamente cuerdas cerradas, orientadas (es decir que podemos distinguir un extremo del otro). La teoría tipo IIA y IIB difieren entre sí por el tipo de D-branas que las habitan. La Tipo IIA tiene solo D-branas de dimensión par, mientras que la Tipo IIB tiene D-branas de dimensión impar. Ello hace que los campos RR y sus compañeros supersimétricos, también sean diferentes. Existe también la llamada Teoría tipo I, que consiste en cuerdas cerradas y abiertas no orientadas. Las D-branas en esta teoría solo poseen dimensión 1, 5 y 9. Existen también dos teorías más, conformadas por cuerdas cerradas pero que son construidas por “pegar” dos cuerdas abiertas con propiedades diferentes. Una de ellas tiene supersimetría, mientras la otra no. Esta heterosis da nombre a las cuerdas involucradas, llamándolas teorías heteróticas. En ellas no hay D-branas, pero todas ellas requieren que el espacio-tiempo sea de dimensión diez y en todas ellas es posible construir modelos específicos en los que el Modelo Estándar de Partículas esté contenido. En algunos casos, propiedades más específicas parecen ser más fáciles de reproducir en una teoría que en la otra.

Pero tener cinco teorías diferentes como propuesta para una unificación completa, no parece ser un buen indicio de lo que se quiere hacer, que es unificar. A pesar de cada teoría de cuerdas está bien construida, la posibilidad de tener varias opciones para describir nuestro universo indicaba dos cosas: o la propuesta es incorrecta o hay una relación entre todas ellas.

Durante la década de los ochenta del siglo pasado y principios de los noventa, hubo un notable interés en buscar estas relaciones. De entre todos los esfuerzos se destaca particularmente la investigación de Edward Witten, físico y matemático estadounidense ganador de la medalla Fields (máximo premio en matemáticas) en 1990, debido a la estrecha relación mostrada entre física teórica y matemáticas modernas. Witten mostró, después de una serie de resultados que las cinco teorías de cuerdas eran en realidad versiones de una única teoría, llamada teoría M.

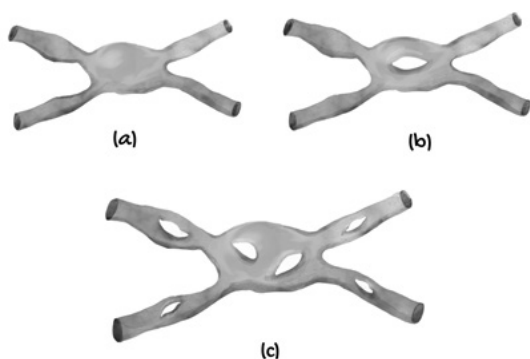
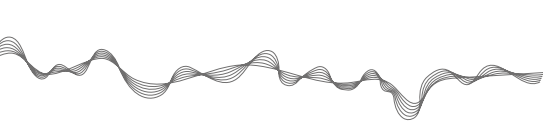
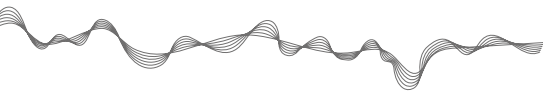


Figura 28. Las interacciones entre cuerdas pueden describirse con diferentes diagramas, tal como para las partículas. En la Figura a) se muestra el diagrama de dos cuerdas cerradas que interactúan y se separan. Este mismo proceso puede suceder con un paso intermedio como el mostrado en la Figura b), donde las cuerdas separadas se vuelven a unir, para después separarse como estado final, o como en la figura c) donde hacen esto mismo varias veces. Las correcciones, como se ve, son topológicas.

Detengámonos a explicar en qué consisten estas relaciones entre diferentes teorías de cuerdas y qué entendemos por esa única teoría M . Además de la dualidad T , existe otra dualidad, llamada dualidad S , que intercambia la intensidad con la que las cuerdas interactúan entre sí, por el valor inverso. Este valor es muy importante, pues nos dice cuándo podemos hacer aproximaciones alrededor de cierto estado de equilibrio de la teoría y cuándo no. Si la intensidad es pequeña, podemos aproximar la interacción de dos cuerdas a una interacción simple como la mostrada en la figura 28-a pues únicamente depende de ese valor, mientras que las otras posibles interacciones intermedias como las mostradas en la figura 28-b y c, dependen de potencias de ese mismo valor, es decir, de su cuadrado, de su cubo, etc. Por lo tanto, si el valor de la interacción es pequeña, podemos despreciar todos esos procesos intermedios. Esa es la versión perturbativa de la teoría.

Con el descubrimiento de las D -branas en las teorías tipo II y tipo I fue posible tener por ejemplo, dos diferentes versiones de objetos de una dimensión: las cuerdas y las $D1$ -branas. ¿Qué relación hay entre ellas? Bueno, pues es posible mostrar que si tomamos el valor de la intensidad de interacción entre las

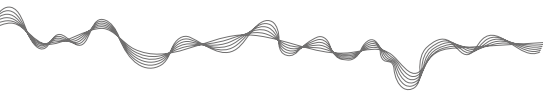


cuerdas y la invertimos (es decir, supongamos que vale $1/2$, y ahora la consideramos con un valor igual a dos) las cuerdas se transforman en D1-branas y viceversa. Así, si tenemos un proceso entre cuerdas que interactúan a un nivel perturbativo, bajo dualidad S tendremos ahora un proceso entre objetos muy pesados como las D-branas, que claramente es no-perturbativo. Describir la física de procesos no-perturbativos, como hemos mencionado varias veces, es muy difícil y complicado. Contar con esta relación nos permite hacer cálculos en la región sencilla (perturbativa) y regresarnos a la región complicada (no-perturbativa) sin haber hecho ningún cálculo en ella.

Además de esta ventaja, ahora podemos ver que mediante dualidad S y dualidad T es posible relacionar diferentes teorías de cuerdas. Por ejemplo, teorías tipo IIA se convierten en tipo IIB bajo dualidad T, la tipo I y una teoría heterótica se relacionan mediante dualidad S. La teoría IIB es transformada a ella misma bajo dualidad S, solo cambiando el régimen perturbativo al no-perturbativo.

Antes de mostrar todas las relaciones, es importante mencionar una parte muy importante en la descripción a bajas energías de las cuerdas, es decir, el considerar únicamente cuerdas cuyas vibraciones no tienen masa. A mediados del siglo XX hubo un enorme esfuerzo por cuantizar la gravedad usando las técnicas de la teoría cuántica de campos. Para ello se hizo uso de todas las herramientas posibles incluyendo la supersimetría. La formulación, como teoría cuántica de campo de una teoría de gravedad en presencia de supersimetría, se conoce como supergravedad.

La supergravedad resultó ser una teoría que no podía responder a preguntas fundamentales, porque para procesos con mucha energía, cercana a la energía de Planck, los valores calculados referentes a las probabilidades de ciertas interacciones entre las partículas involucradas, con el gravitón como parte fundamental de ellas, arrojaban números infinitos. Sin embargo, su estudio nos permitió entender hasta qué límite podíamos extender la relación entre campos y gravedad. Nunca un estudio, aún cuando los resultados sean



aparentemente negativos, va a ser una investigación inútil, pues a través de ella podemos establecer el límite de lo que funciona o no para describir a la naturaleza.

Volviendo a la supergravedad, los físicos encontraron que había varias maneras de formular una teoría de supergravedad y en diferentes dimensiones del espacio-tiempo. Note el lector que estamos hablando de una formulación que precedió a la formulación a bajas energías de la teoría de cuerdas, una formulación independiente. Lo más curiosos de esa investigación, es que se encontró que una teoría de supergravedad puede ser formulada en un espacio-tiempo con dimensiones desde 2 hasta 11. Había un límite en la dimensión del espacio-tiempo que permitiera construir una teoría de supergravedad. Más aún, en diez dimensiones, parecía haber genéricamente dos tipos de supergravedad. ¿Qué tiene de especial una dimensión del espacio-tiempo igual a 10 o 11?

Con la subsecuente construcción de las teorías de cuerdas, se entendió que si sólo consideramos las vibraciones sin masa de las cuerdas cuánticas, la teoría de campo producida por ellas es precisamente una teoría de supergravedad. Así, el límite a bajas energías de las cinco teorías de cuerdas, corresponden a versiones de una teoría de supergravedad en diez dimensiones. La supergravedad es en este sentido, la primera aproximación a una teoría más completa de gravedad cuántica, como la teoría de cuerdas.

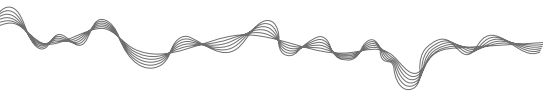
¿Qué pasa entonces con la supergravedad en once dimensiones? ¿es también el límite a bajas energías de alguna otra teoría? Witten se dio cuenta que uno de los campos que surgen en la cuantización de la cuerda se comporta como una coordenada extra, es como tomar una cuerda (de la teoría tipo IIA) e inflarla. En realidad se trata de un toro, o dona, solo que al tomarla en cuenta, al sumarle esta dimensión extra, la teoría pierde su comportamiento perturbativo. A la teoría con esta dimensión extra, que al no considerarla se reduce a la teoría IIA de cuerdas, es la teoría única cuyos diferentes límites a bajas energías en diez dimensiones, son

las cinco teorías de cuerdas que hemos visto. Si no reducimos ninguna dimensión y simplemente tomamos bajas energías, entonces recuperamos la teoría de supergravedad en once dimensiones. La teoría M es una teoría cuántica cuyos objetos fundamentales son membranas no perturbativas de dos dimensiones, que precisamente se reducen a las cuerdas en una dimensión menor. Poco se sabe de esta teoría desde que fue propuesta por Witten, además de los diferentes límites que la conectan a teoría de cuerdas (ver figura 29).



Figura 29. La teoría M en once dimensiones y sus diferentes límites a bajas energías correspondientes a diferentes tipos de teoría de cuerdas en diez dimensiones.

La teoría de cuerdas y D-branas es una teoría en construcción. Una construcción que a la fecha lleva más de cuarenta años y que ha permitido conocer mucho más, tanto de la propia teoría como de la naturaleza de la gravedad cuántica. No olvidemos que el objetivo es sumamente ambicioso, pero creemos tener suficiente conocimiento de la teoría como para arriesgarnos a usarlo y tratar de responder preguntas que involucren la existencia y evolución de nuestro universo. Queremos entender cómo es un universo hecho de cuerdas y ver qué tan parecido es con el universo que habitamos.



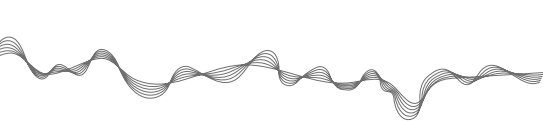
9. UN UNIVERSO DE CUERDAS

“La cosmología tiene la capacidad de llamar nuestra atención a un nivel profundo y visceral, porque comprender cómo comenzó todo es, al menos para algunos, el punto en el que podemos encontrarnos más cerca de comprender por qué empezó.”

Brian Greene, *El Universo elegante*

Hemos descrito una propuesta, una teoría cuyo objetivo es ofrecernos una manera de cuantizar la gravedad. Esta teoría desplaza a las partículas puntuales (y sus interacciones puntuales) y coloca a las cuerdas y D-branas como objetos fundamentales con dinámica, con energía. Su vibración cuántica establece la existencia de diversos campos y partículas que, junto con cuerdas y D-branas contribuyen a la energía con la que se impregnan las dimensiones extra, predichas por la misma teoría. El universo que describe la teoría de cuerdas es uno en el que las dimensiones extra juegan un papel relevante en la evolución del universo que observamos. Al ser el espacio de dimensiones extra invisible a nuestra escala energética, es posible que las consecuencias de su existencia nos parezcan extrañas y a la vez puedan ser la solución a preguntas relevantes acerca de las propiedades del universo. En este capítulo veremos ejemplos de cómo esto puede ser posible.

La típica imagen que se tiene de este modelo es esquematizada en la figura 30. El universo posee diez dimensiones, de las cuales cuatro (tres espaciales y una temporal) son de



grandes dimensiones y se extienden tanto que no sabemos si su tamaño es finito o infinito. Las otras seis deben estar enrolladas, compactadas en volúmenes muy pequeños, a tal grado que nos es imposible (hasta ahora) detectar de manera directa su presencia. Pero debe haber profundas consecuencias de su existencia de manera indirecta. Así, en cada punto del espacio-tiempo de cuatro dimensiones existe un espacio de dimensiones extra, en donde las D-branas y las cuerdas pueden propagarse, interactuar, colisionar y llenar de campos todo el espacio al ritmo de su vibración.

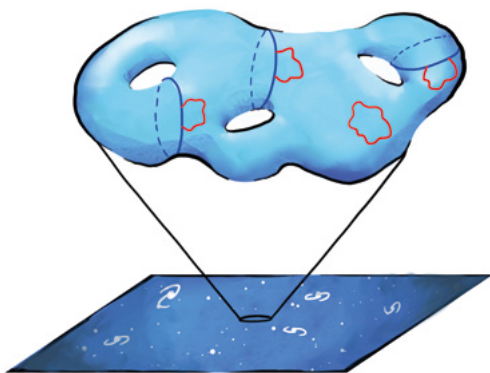
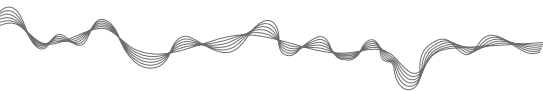


Figura 30. Imagen del universo según la teoría de cuerdas. En cada punto tenemos un espacio de seis dimensiones compactas en las que las cuerdas y D-branas presentan una dinámica que influye en la del universo que observamos.

Básicamente tenemos el mismo espacio de seis dimensiones en cada punto. Con ello queremos decir que esperamos que las propiedades que tenga ese espacio y que determinen aspectos fundamentales de lo que observamos, como el modelo estándar de partículas, sean las mismas en todo punto. Así, en un punto puede haber D-branas curvadas parcialmente en las dimensiones extra; las cuerdas conectadas a ellas reproducen en su vibrar cuántico al conjunto de partículas y fuerzas que observamos. Las variaciones de un punto a otro pueden estar relacionadas con intensidades más fuertes de ciertos campos, o la presencia de alguna D-brana curvando ciertas zonas y manifestándose como un agujero negro.

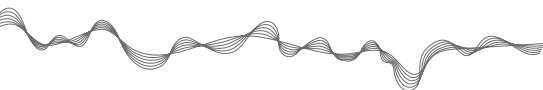


A pesar de estos grandes avances cualitativos, aun no tenemos un modelo específico que nos lleve directamente a los valores medidos de cargas, masas e interacciones como las que observamos en el modelo estándar, ni a describir microscópicamente hoyos negros sin supersimetría. Aunque muchas veces esto ha sido utilizado como un defecto de la teoría de cuerdas, es justo mencionar la magnitud de lo que se pide: recordemos que las cuerdas son tan pequeñas, que si un humano tuviera el tamaño de una galaxia, las cuerdas serían del tamaño de un quark. Imaginemos entonces la enorme proeza de buscar implicaciones en la dinámica de una galaxia a través del cálculo de interacciones con quarks. Así de ambiciosa es la teoría de cuerdas. Sin embargo, tenemos avances.

Recordemos primero lo que implica tener un universo formado por cuerdas y D-branas. De las nueve coordenadas espaciales, tres están extendidas, mientras las otras seis están compactadas en espacios de tamaño minúsculo, tan pequeños que solo las cuerdas y branas son capaces de moverse e interactuar en ellos. Así, el universo parece estar conectado por dos diferentes espacios que se comunican entre sí precisamente a través de la dinámica de las cuerdas y branas que en ellos habitan. Este hecho es lo que hace relevante el modelo de cuerdas para su descripción del universo, lo que llamamos cosmología de cuerdas.

¿Cómo es que lo que pasa en las dimensiones extra, en esos pequeños espacios compactos tan pequeños que no podemos detectarlos aun a las energías que alcanza un acelerador de partículas, puede determinar propiedades del universo que percibimos en tres dimensiones espaciales? La clave está en la energía que poseen debido a todos esos objetos que en ellas habitan.

Para tratar de visualizar lo que sucede, hagamos uso nuevamente de una analogía, pero tengamos presente que, como en cualquier otra analogía, hay características del modelo que no se ven enteramente reflejadas en el ejemplo que queremos visualizar. Un ejemplo clásico de una analogía que lleva a confusiones es precisamente la expansión del



universo, que comúnmente se explica a través de imaginar un globo y de dibujar a las galaxias como puntos en él y que a medida que se infla, aumenta la distancia entre los puntos, es decir, entre las galaxias. La analogía falla cuando queremos llevarla a un modelo real, pues siempre surge la pregunta sobre qué es el espacio en el que se expande el globo. En el universo no existe tal espacio. Es solo una manera de tratar de transmitir la idea de la expansión, pero en realidad el universo no es un globo que se infla en un espacio más grande, al menos hasta donde podemos observar.

Dicho esto, usemos la misma analogía del globo para poder explicar de manera sencilla el intercambio de información entre las dimensiones extra y el universo tridimensional que observamos. Pensemos que tenemos un globo enorme y que tomamos una parte de él, lo torcemos y creamos una protuberancia del mismo globo, más chica que el globo original, tal como las figuras de animales que se hacen de globos en las fiestas infantiles (ver figura 31).

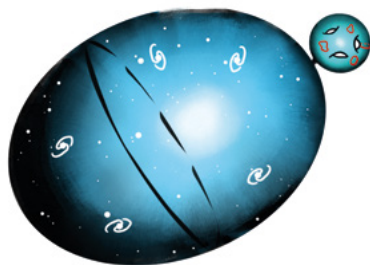
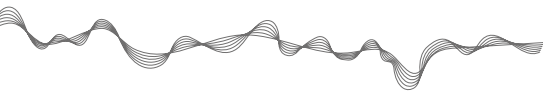


Figura 31. El universo-globo. Las dimensiones extra proveen de energía al universo 4-dimensional.

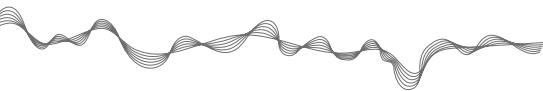
Para que esa pequeña porción del globo se mantenga estable, es necesario que hagamos algo, que lo enrosquemos lo suficiente para que la presión del aire no destruya lo que hemos hecho. De igual manera, el volumen de las dimensiones extra (ese pequeño globo o protuberancia) requiere de energía para mantenerse. Con más energía, podemos hacer que el globo secundario sea más grande y eso sin duda afecta la forma del globo restante.



La energía que estamos proporcionando debe provenir de algún lado. En el modelo de la teoría de cuerdas, esa energía proviene de las propias cuerdas, de las D-branas y de los campos generados por la oscilación cuántica de las cuerdas, a los que llamamos flujos. Si logramos tener una configuración de todos esos objetos que mantengan estable el volumen de las dimensiones extra, este se percibirá en nuestro universo tridimensional como un número, como un valor de energía presente en todo el universo proveniente de la dinámica cuántica de cuerdas y D-branas en las dimensiones extra.

Encontrar una solución dentro de la complejidad de la teoría de cuerdas no es un reto sencillo. Por ello se comenzó a trabajar en modelos muy simples que nos permitieran comprender aspectos básicos de este modelo. En la década de los noventa del siglo pasado se encontró una solución bajo ciertas condiciones muy especiales. Se consideraron cuerdas cuyas vibraciones solo produjeran el gravitón y otros campos relacionados con la intensidad con la que las cuerdas interactúan entre sí, así como vibraciones de las cuerdas cuya energía no fuera considerada en todo punto del espacio de dimensiones extra.

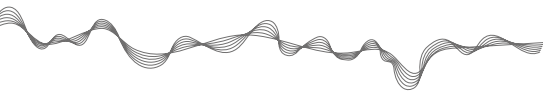
Bajo estas restricciones, se encontró que el espacio de dimensiones extra debía cumplir con ciertas propiedades matemáticas muy especiales. Afortunadamente, como en la mayoría de la historia de la física y su relación con las matemáticas, esos espacios ya habían sido muy bien estudiados por los matemáticos, en especial por los investigadores Eugenio Calabi y Shing-Tung Yau, por lo que dichos espacios recibieron el nombre de Calabi-Yau. Así, el proceso de enrollar las dimensiones extras en espacios Calabi-Yau, conocido como compactación, permitió obtener escenarios de campos físicos que podían contener al modelo estándar de partículas. Esencialmente lo que sucede es que cuando uno compacta las dimensiones extra en espacios genéricos, como una dona de seis dimensiones (el producto geométrico de seis círculos), la relación entre bosones y fermiones proveniente de las cuerdas, se manifiesta en cuatro dimensiones como una relación más complicada. A cada bosón



le pueden corresponder más de un fermión y viceversa. Resulta que el modelo estándar de partículas solo puede existir en una teoría supersimétrica con una única relación entre bosones y fermiones, no más. Así que compactar las dimensiones extra en un espacio Calabi-Yau, permitió obtener una teoría realista. Faltaba por supuesto encontrar un mecanismo que desapareciera ese remanente de la supersimetría, pues como hemos mencionado, ella no se observa al menos a las escalas de energía a las que hemos llegado.

La compactación en espacios Calabi-Yau trae consigo varios problemas por resolver. Primero, hay un enorme número de diferentes espacios Calabi-Yau de seis dimensiones. Son miles de millones. Cada uno de ellos, define propiedades diferentes en el universo de cuatro dimensiones que se genera. Eso por supuesto nos lleva de manera inmediata a preguntarnos qué es lo que hace especial a nuestro universo. Segundo, una vez compactadas las dimensiones extra en uno de estos espacios, la energía que provee al universo, proveniente de las cuerdas y D-branas que en él habitan, es fija, lo que significa que el universo tendría siempre la misma cantidad de energía y, por lo tanto, dependiendo de su valor, estaría en un constante estado de expansión, contracción o simplemente estaría estático. Algo que sabemos que no ocurre con lo observado. Tercero, la energía proporcionada no depende de valores importantes en el proceso de compactación, como lo son el volumen o tamaño de las dimensiones extra, ni de su forma ni de la magnitud de las interacciones entre cuerdas. Esto significa que en principio podríamos darle cualquier valor al tamaño de las dimensiones extra, incluso uno muy grande, rompiendo así nuestra suposición inicial de tener un espacio de volumen pequeño; pero aún más problemático es que estas propiedades, tamaño, forma, intensidad de interacción, se manifiestan en cuatro dimensiones como partículas sin masa, lo que significa que pueden viajar a la velocidad de la luz y por lo tanto ser mediadores de fuerzas que nunca hemos observado.

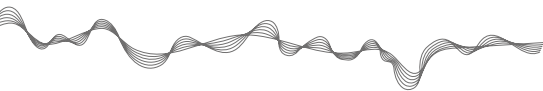
Este tipo de problemas eran de esperarse puesto que partimos de una solución simple. Si ahora permitimos la



presencia de todo tipo de vibraciones de las cuerdas, aún aquellas con energía diferente de cero, la propia teoría de cuerdas dice que la solución anterior ya no es posible, pues la naturaleza de las configuraciones de cuerdas y D-branas es cuántica, es decir, que debido al principio de incertidumbre se encuentran en constante cambio. El volumen no puede por tanto adquirir un valor fijo y preciso. Es posible que esas perturbaciones cuánticas impliquen un cambio mayor en las configuraciones de cuerdas y D-branas, es decir, que no sea estable y ese cambio debe reflejarse en la energía que recibe nuestro universo y por lo tanto en una dinámica más rica con diferentes fases de expansión y contracción. Detengámonos por un minuto para contemplar lo sencillo del argumento, pues con base en la existencia de dimensiones extra y su comportamiento cuántico podemos explicar y predecir que nuestro universo debe ser dinámico.

La inclusión de todas las vibraciones de la cuerda, sin apagar *ad hoc* la energía de algunas de ellas, conlleva a una configuración con muchas variables y, por ende, resultaba muy complicado obtener una solución bajo esas condiciones. En el año 2001, los físicos estadounidenses Steven B. Giddings, Shamit Kachru y Joseph Polchinski publicaron un trabajo de investigación abordando este tema: la compactación de teorías de cuerdas en presencia de todos los flujos provenientes de las vibraciones cuánticas de la cuerda. El trabajo fue de enorme relevancia, pues prácticamente todos los modelos que intentan relacionar la teoría de cuerdas con la cosmología y con la física de partículas se basan en estos resultados.

El problema de encender todos los flujos radica en el hecho de que esos campos que poseen energía y que antes habían sido ignorados, modifican la geometría del espacio de dimensiones extra. Esto es consecuencia de la relatividad general, pues la energía gravita, es decir, contribuye a la curvatura del espacio. Dado que estos flujos poseen energía, la forma, volumen e intensidad de interacción entre las cuerdas se ve modificada en su presencia. Si hubiésemos partido de



este punto, la pregunta directa es ¿qué es lo que modifica? Así que el trabajo previo sobre la compactación en espacios Calabi-Yau establece la base a partir de la cual podemos estudiar modificaciones de esos espacios. Sin ese estudio no sabríamos de dónde partir. Lo que quiero enfatizar aquí, es la enorme importancia de estudiar sistemas simples de algo que no comprendemos del todo, pues ese “pequeño” paso nos permite avanzar a situaciones más complejas.

En presencia de flujos, los espacios Calabi-Yau se deforman. Dependiendo de los valores de cada uno de ellos, se pueden clasificar esas deformaciones. En algunos casos son tan severas que es muy complicado incluso entender su estructura matemática. En otros, las deformaciones parecen ser controladas y podemos hablar de que se parecen mucho a un espacio Calabi-Yau. Es como tomar una bola de arcilla y ligeramente deformarla mientras la presionamos con las manos. Este tipo de espacios de dimensiones extra son los más usados para recrear condiciones importantes en la evolución del universo.

¿Qué es entonces lo que sucede en presencia de estos flujos? De la misma manera en que cuando tratamos de hacer figuras con un globo, la figura original poco a poco se va modificando por la misma presión del aire; así, debido a la naturaleza cuántica de cuerdas, D-branas y flujos, una configuración aparentemente estable que fije el volumen y la forma del espacio de dimensiones extra puede modificarse.

Pensemos que tenemos un espacio de seis dimensiones con ciertas características (como el número de hoyos que posee). Podemos enrollar cuerdas cuya tensión lo deformará de alguna manera. Lo mismo pasará con las D-branas y flujos que, al enrollarse en diferentes lugares, lo aprisionan, lo tuercen, lo curvan. Pero las cuerdas oscilan, las branas vibran al compás de sus cuerdas abiertas y los flujos son de naturaleza cuántica. El sistema no es un sistema rígido de objetos y lo que parece ser una configuración estable es muy probable que no lo sea para siempre (ver figura 32).

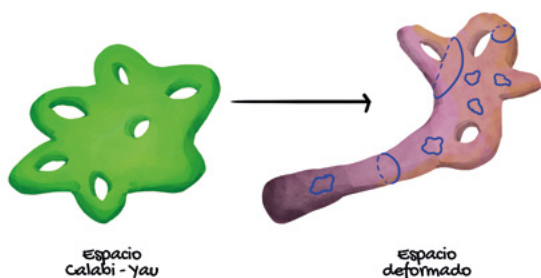
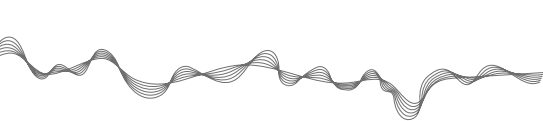
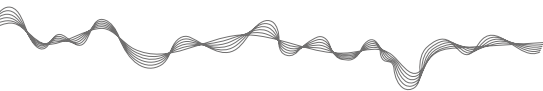


Figura 32. Los espacios Calabi-Yau son ejemplos concretos de los espacios compactos de dimensiones extra. La presencia de cuerdas y D-branas los deforman.

Poco a poco, el sistema se reajusta. El volumen y el torcimiento de las dimensiones extra cambian. Parte de la energía de la configuración inicial se usa para su propio reajuste y el resto se diluye en el universo. Hay mucha energía que se libera al espacio de cuatro dimensiones, en donde las variables que determinan al volumen y a la forma, no son visibles desde esa perspectiva y, por lo tanto, un observador en el espacio-tiempo 4-dimensional verá que se trata de un campo escalar, un valor asociado con la dinámica del universo cuya energía cambia con el tiempo. Es como si la figura de globos que hemos hecho se vuelva de pronto inestable y al deshacerse, salga volando de nuestras manos con una fuerza que podemos sentir. Así, la inestabilidad de las dimensiones extra provocada por la dinámica de cuerdas, branas y flujos, inyecta de energía a nuestro universo de cuatro dimensiones provocando su expansión.

Esta idea sobre la posible influencia de las dimensiones extra en la expansión del universo provee de ciertas explicaciones a preguntas abiertas. Un ejemplo de ello es que podemos entender que el universo comienza en un estado de máxima energía debido a la configuración específica que hemos consideramos. A medida que esa configuración pierde energía, la expansión del universo continúa.

Podría suceder un caso especial en el que la configuración de cuerdas, D-branas y flujos alcance un estado semi-estacionario. Esto significa que, aunque sigue cambiando, sus



cambios son muy pequeños, lo que ocasiona que la cantidad de energía de las dimensiones extra se ve reflejada totalmente en la forma en que el universo se expande. En este caso especial, el universo sufre una expansión acelerada, pues la energía cinética asociada al cambio del volumen y forma de las dimensiones extra es muy pequeña y toda la energía se convierte en energía potencial asociada a esa expansión. De esta forma cualitativa podemos describir la etapa inflacionaria que creemos tuvo lugar en el universo temprano.

Posterior a esta etapa, es posible que el propio re-acomodo de la configuración vuelva a sufrir cambios bruscos que hagan que el universo abandone su etapa inflacionaria y alcance un estado final. Este estado puede tener diferentes destinos. El primero es que la configuración alcance un equilibrio completo a pesar de las fluctuaciones cuánticas. Si el nivel de energía asociado a la configuración de objetos en las dimensiones extra es tal que la energía es negativa, el universo deberá alcanzar un estado de contracción. Pero si esa energía es positiva, el universo comenzará de nuevo una etapa de expansión acelerada. Es esta expansión la que hoy observamos que está sucediendo en nuestro universo, por lo que creemos que la configuración final debería alcanzar un estado estable con energía positiva.

En el año 2003, un trabajo de Shamit Kachru, Renata Kallosh, Andrei Linde y Sandip Trivedi mostraron por primera vez la posibilidad de generar un vacío con energía positiva a través de configuraciones de D-branas y flujos en una compactación en un espacio de dimensiones extra ligeramente deformado respecto a un espacio Calabi-Yau. A lo largo de los últimos 20 años, la controversia sobre si la configuración es posible de realizarse o no continúa y es parte de las discusiones de la comunidad. Pero dejando a un lado eso, el modelo KKLT, como se le conoce por las siglas de sus autores, es un modelo que motiva a la búsqueda de posibles diferentes escenarios en los que se pueda reproducir un vacío con energía positiva y de ese modo replicar una constante cosmológica que nos explique la expansión acelerada del universo.



Otro posible destino es que la configuración a la que hacemos referencia nunca alcance un estado de equilibrio pero que gradualmente su energía disminuya. Eso, bajo ciertas circunstancias también provocaría una expansión acelerada del universo, pues la energía asociada a las dimensiones extra alcanzarían un equilibrio, aunque no así el volumen de ellas.

Esta es la descripción cualitativa de cómo la evolución del universo podría explicarse a través de la dinámica de la teoría de cuerdas y la existencia de dimensiones extra. La constante cosmológica sería, en este sentido, una medida de la energía contenida en las dimensiones extra debida a la configuración de flujos y D-branas, mientras que su evolución responde al hecho de que estas configuraciones no son estáticas; están sometidas a las fuerzas entre ellas y a las fluctuaciones cuánticas (ver figura 33).

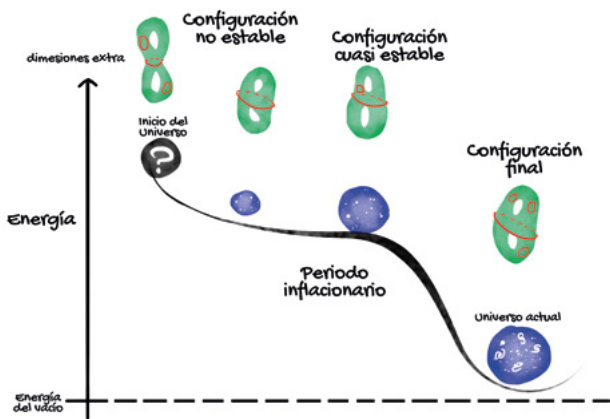
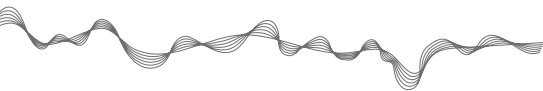


Figura 33. La dinámica del universo y la influencia de las dimensiones extra.

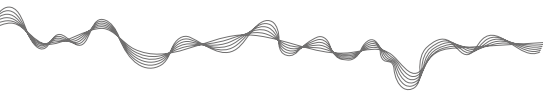
Sin embargo, aún hay muchas preguntas abiertas. Observemos primero que las fluctuaciones cuánticas de nuestro modelo parecen ser muy importantes. Al tener una naturaleza cuántica, es probable que todas ellas puedan manifestarse dando lugar a configuraciones finales diferentes



en cada caso. ¿Cuál es la que hizo que nuestro universo sea tal y como lo observamos? ¿Hay alguna razón especial que no hemos encontrado? Aún si encontráramos la configuración inicial adecuada que diera origen de manera precisa a nuestro universo, las fluctuaciones cuánticas de nuestras configuraciones acabarían por darnos miles de universos diferentes, es decir, la etapa inflacionaria y de expansión en esta etapa primaria del universo es muy sensible a cambios de energía. Estamos hablando de un tiempo alrededor de $10^{(-32)}$ segundos después de que la configuración comenzó a ser inestable, esto es casi un cuatrillonésimo de segundo.

Aunado a lo anterior, recordemos que tenemos una inmensidad de posibilidades de elegir nuestra configuración inicial. ¿Qué determina cuál elegir? ¿Cuántas cuerdas, branas y flujos debemos poner? Cada diferente condición inicial, de igual manera nos llevará a diferentes soluciones, a diferentes universos. ¿Debe ser el universo que vemos una única solución? O por el contrario, ¿está nuestro universo descrito por una más de las millones de posibles soluciones?





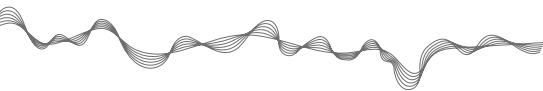
10. EL PAISAJE Y EL PANTANO

“No se puede probar nada en el reino del pensamiento; pero el pensamiento puede explicar muchas cosas.”

Martin Heidegger

Durante las dos últimas décadas, esta última visión, ha cobrado un ímpetu muy grande en la comunidad de científicos dedicados a la fenomenología de cuerdas, la rama de la teoría de cuerdas que se propone describir y responder aspectos y preguntas abiertas del universo. Dentro de este esquema, es decir, el pensar que nuestro universo es solo una opción de entre otras muchas, la teoría de cuerdas predice la existencia de un enorme número de posibles universos, algunos conectados entre sí por las dualidades que describimos anteriormente. A todo el conjunto de soluciones, también llamados vacíos de la teoría de cuerdas, donde cada una de ellas representa un posible universo, se le conoce como “el Paisaje de Cuerdas”. Nuestro universo debe ser parte de ese Paisaje.

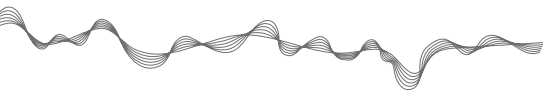
Existen otros posibles universos, como uno donde el universo no se expanda, sino se contraiga, otro donde se expanda cada vez más lentamente hasta diluirse en el infinito. Otro donde se expanda y proceda a contraerse, etc. Podríamos explicar la existencia del nuestro por estadística de todos esos vacíos, es decir, si



resulta que un universo con las características del nuestro sea uno de los más probables.

El problema con esta visión es que realmente no conocemos con certeza que nuestros vacíos sean soluciones verdaderas de la teoría. Recordemos cómo los hemos construido. Hemos usado los estados sin masa de las vibraciones de las cuerdas, y hemos usado que las dimensiones extra reaccionan a cuerdas, D-branas y flujos, pero solo en relación nuevamente a esos estados sin masa. Hay otros estados que son importantes a energías mayores, justo cuando la configuración de dimensiones extra comienza a desestabilizarse. Lo que quiero decir con esto es que tenemos una muy buena noción de cómo construir una teoría que provenga de cuerdas considerando solo sus estados de más baja energía, pero al hacerlo es posible que estemos despreciando o ignorando muchas de las componentes que son parte de la misma teoría de cuerdas y que resulten esenciales para la descripción de fenómenos que queremos entender, como el proceso inflacionario en las etapas tempranas del universo, o como la expansión acelerada que observamos hoy en día.

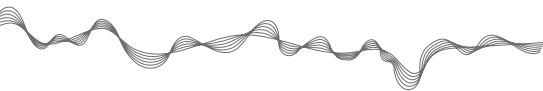
Para comprender mejor lo que se ha dicho, pensemos en la razón por la que los objetos no se atraviesan unos a otros. ¿Por qué no puedo con un dedo atravesar la mesa? Si quiero construir mi respuesta basándome en la estructura cuántica del átomo no puedo despreciar las energías, por ejemplo, que poseen los electrones confinados al núcleo. Si lo hago, podré sin duda construir una teoría que me sirva a los niveles de energía con los que convivo día a día, pero también sin duda, no será una teoría compatible a nivel cuántico. Podremos decir que hay una fuerza normal, perpendicular a la mesa, pero no podremos saber su naturaleza cuántica. Esto mismo puede estar pasando en nuestro intento de modelar la cosmología con la teoría de cuerdas, al tomar solo objetos provenientes de las cuerdas a los niveles más bajos de energía, es posible que estemos perdiendo elementos esenciales en la descripción completa de una teoría cuántica de gravedad.



Esta última propuesta ha llevado a pensar a varios científicos que no todas las teorías construidas con el mínimo de elementos de la teoría de cuerdas son compatibles con una teoría cuántica de gravedad, es decir, que podemos estar construyendo teorías que pueden funcionar de manera efectiva a escalas de energía mucho menores en las que la gravedad cuántica pudiera manifestarse, pero que necesitan ser reformuladas si queremos extender su validez hasta escalas de energía cercanas a la de Planck.

Para poder distinguir teorías compatibles con la gravedad cuántica de aquellas que no lo son, es necesario saber qué ingredientes son fundamentales en una teoría cuántica de gravedad. Hay varias propuestas para ello, basadas en propiedades genéricas de cualesquiera de las teorías de cuerdas construidas en diez dimensiones, es decir, previo a la escala de compactación y es posible que todas ellas estén relacionadas entre sí. A estas propuestas se les llama “Conjeturas del Pantano”, pues nos permiten identificar las teorías que no poseen los ingredientes que creemos son básicos y que son construidas con elementos mínimos de la teoría de cuerdas. A este grupo de teorías se les denomina el pantano de cuerdas. Así, el conjunto de posibles universos construidos como límites a bajas energías de la teoría de cuerdas se dividen básicamente en aquellas que sí son compatibles con las cualidades que debe poseer una teoría de gravedad cuántica y a las que conjuntamos en el llamado paisaje de cuerdas y aquellas que no lo son y que pertenecen al pantano (ver figura 34).

Pero, ¿cuáles son esas características que creemos fundamentales? Aquí es importante recalcar que estamos justo en la frontera del conocimiento, donde las propuestas pueden o no resultar ciertas. Solo la investigación continua lo dirá en algunos años. Dicho esto, lo que en este momento creemos que es fundamental son principalmente dos características de la gravedad cuántica: que la fuerza de gravedad es la fuerza más débil de todas y que no existen



simetrías globales. La primera deshecha cualquier escenario en el que la fuerza de gravedad pueda ser más fuerte que otras fuerzas como la electromagnética, la débil y la fuerte, mientras que la segunda propuesta se refiere a que en una teoría cuántica de gravedad; no es posible hacer transformaciones que dejen invariante al sistema, si estas no dependen de las coordenadas del espacio-tiempo.

Existen otras propuestas no tan fuertemente apoyadas por evidencia matemática, como la conjetura de la distancia, que nos dice que a medida que los parámetros que definen al volumen y a la forma del espacio de dimensiones extra cambian, podemos trazar una distancia desde los valores iniciales de esos parámetros hasta el punto final. Si la distancia es muy grande, nuevos estados sin masa se deberán incorporar a la teoría efectiva que estemos trabajando, por lo que se invalida la teoría de la que partimos.

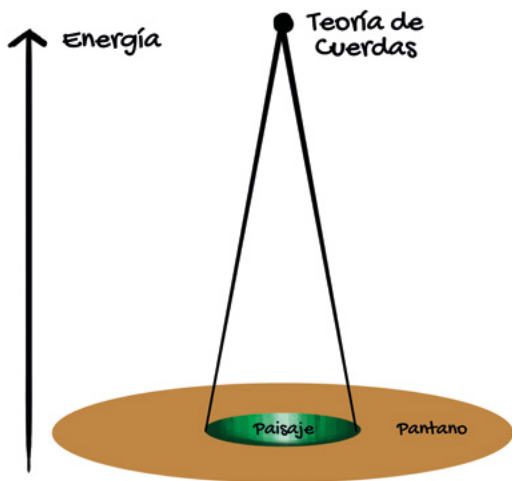
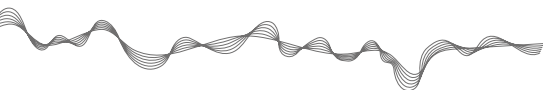


Figura 34. El paisaje y el pantano. Las teorías efectivas (a bajas energías) que son compatibles con la teoría de cuerdas pertenecen al paisaje, mientras que aquellas que no, pertenecen al pantano.



Por ejemplo, supongamos que podemos trazar una trayectoria que muestre cómo va cambiando gradualmente el espacio de dimensiones extra debido al cambio en las configuraciones de D-branas y flujos. Comencemos con un espacio Calabi-Yau y poco a poco encendemos los flujos y colocamos D-branas en ciertas regiones. Si la deformación continua hasta distancias muy grandes del punto inicial, terminaremos con una variedad muy deformada donde los flujos que encendimos al principio no serán suficientes para construir la teoría a bajas energías que observaríamos en el universo de cuatro dimensiones, es decir, necesitamos otros campos, otras D-branas. El espacio de dimensiones extra en ese punto final no puede construirse de las condiciones iniciales y, sin embargo, es posible llegar a él simplemente deformando su volumen y forma, entre otras propiedades (ver figura 35).

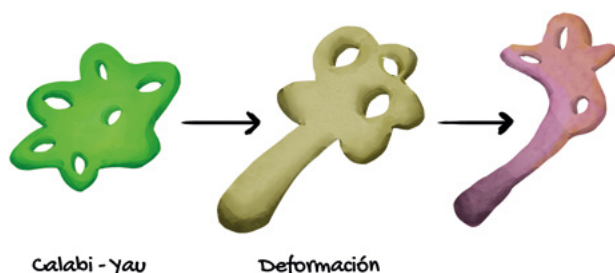
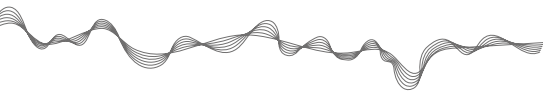


Figura 35. Deformaciones extremas de los espacios Calabi-Yau. El espacio final puede no ser una solución a las condiciones en las que comenzamos la deformación.

Otra de las conjeturas del pantano dice que, si el espacio de dimensiones extra se deforma mucho, no es posible tener una configuración estable con energía positiva, por lo que la propuesta de explicar la expansión acelerada del universo por medio de este mecanismo es infructuosa.

Las conjeturas del pantano han permitido reformular los modelos que tenemos y preguntarnos cuáles son los elementos esenciales que se requieren para tener un escenario más realista de un universo constituido por cuerdas y D-branas. Sin duda, aún hay mucho que aprender en esta área de la teoría de cuerdas.



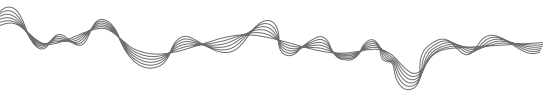
11. EPÍLOGO: ¿ES LA TEORÍA DE CUERDAS UNA TEORÍA REAL?

“No importa que tan bella es tu teoría, no importa que tan inteligente seas. Si no concuerda con el experimento, está mal”

Richard Feynmann

La teoría de cuerdas es una propuesta aún en construcción. A pesar de haber sido inicialmente formulada hace más de 40 años, aún no conocemos la estructura completa que la subyace. Esto es usado comúnmente como una crítica a su complejidad, pero su mayor crítica se debe a la ausencia de una evidencia observacional o experimental que pueda falsearla, es decir, que permita corroborar o refutar su realidad física. ¿Por qué entonces existen cientos de físicas y físicos trabajando en ella alrededor de todo el mundo? ¿Cómo es que grandes pensadores siguen buscando respuestas entre sus intrincados enlaces?

La teoría de cuerdas es una propuesta muy ambiciosa, pues pretende describir gran parte de lo que observamos a partir de un mínimo de fundamentos. Esperar que podamos decir algo concreto del universo que observamos, a la escala energética en que lo hacemos, es aún más ambicioso. Es tanto como usar teoría cuántica de campos y la dinámica de los quarks para decir algo sobre la dinámica de las galaxias. Sin embargo, creemos que las cuerdas y D-branas pueden sernos útiles para describir en sus



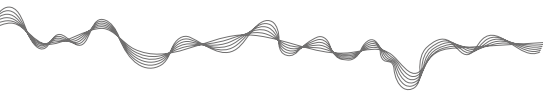
términos las condiciones iniciales del universo, y entonces explicar los “cómo” y los “por qué” que constantemente nos planteamos al mirar el cielo estrellado.

Muy probablemente la teoría de cuerdas no es la teoría del todo. Parte de hechos asumidos, como la validez de la mecánica cuántica, la de la relatividad especial, la existencia de simetrías como la supersimetría, pero sin duda es un ejercicio que lleva al límite nuestro entendimiento de la naturaleza y de cómo traducirla a un lenguaje matemático que ha probado una y otra vez haber funcionado en situaciones menos complejas y a escalas energéticas más bajas.

La teoría de cuerdas es el mejor candidato que tenemos para una descripción cuántica de la gravedad y una unificación con las otras fuerzas. Es una propuesta que ha permitido conocer mucho mejor lo que esperamos de una teoría cuántica de la gravedad, pero, sobre todo, es una teoría que reproduce todo lo que con certeza sabemos que es parte fundamental de la naturaleza.

La teoría de cuerdas predice la existencia de la gravedad, tal como la formuló Einstein. Predice la existencia de fuerzas como la electromagnética, la débil y la fuerte. Predice la existencia de supersimetría y la existencia de dimensiones extra. Así mismo, predice la existencia de una plétora de campos que pueden dar origen a la llamada materia oscura y da la posibilidad de explicar la presente expansión acelerada del universo, también conocida como energía oscura, a través del conteo de la energía que constituye la configuración del espacio de dimensiones extra y los objetos cuánticos que ahí residen. La constante cosmológica es, de acuerdo al modelo que hemos descrito, una medida de la energía en el espacio de dimensiones extra. En este ámbito, da la posibilidad de describir el estado inicial del universo, cuya energía inicial no es sino el reflejo de una configuración inestable de cuerdas y D-branas en las dimensiones extra.

Todo ello es resultado de la extrapolación de nuestro conocimiento del universo. Un conocimiento que hemos

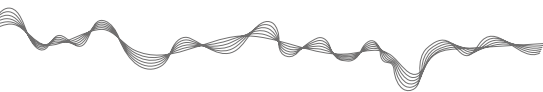


llevado al lenguaje de las matemáticas. La relación entre nuestra curiosidad y el lenguaje abstracto matemático ha permitido en los últimos siglos formular nuestras más exitosas teorías. Es un hecho que funciona al menos a la escala de energía en la que nos encontramos.

Si esta relación es verdadera, la teoría de cuerda deberá almacenar muchas verdades en su propia estructura que estarían por descubrirse. Si no, igualmente estamos ante un escenario único, donde la extrapolación matemática no sería suficiente para describir los escenarios iniciales de nuestro universo y una nueva posición filosófica sería necesaria. Cualquier escenario es una invitación para seguir poniendo a prueba nuestra capacidad de entender nuestro lugar en el universo.

Si la teoría de cuerdas es correcta, estamos frente a una propuesta que permitirá acercarnos más a conocer las razones que dieron origen a nuestro universo. Así, al igual que en una guitarra, las cuerdas y D-branas vibran en armonía y con sus notas establecen la música bajo la cual el propio universo nace, crece y baila hasta su muerte.



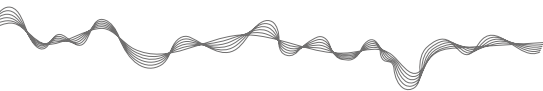


APÉNDICE 1: ¿POR QUÉ 10 DIMENSIONES?

No es sencillo explicar la razón por la que la se requiere que la dimensión del espacio-tiempo sea diez. Ello refleja nuestro aún limitado entendimiento de la teoría, pues cuando algo se comprende a profundidad, no debería ser complicado expresarlo en términos llanos. Hagamos un esfuerzo por hacerlo. Estrictamente, la restricción del número de dimensiones surge porque una de las simetrías que parece tener una cuerda no cuántica, no se preserva una vez que la pensamos como objeto cuántico.

Veamos esto con más detalle. Al paso del tiempo, una cuerda describe una superficie de dos dimensiones en el espacio-tiempo, llamada hoja de mundo. Si nos fijamos en un punto sobre la cuerda, podemos describir su velocidad en la hoja de mundo, que es el cambio de su posición respecto al tiempo o el cambio de ese mismo punto respecto a la longitud de la cuerda, es decir, tenemos dos direcciones de cambio de posición. Estas dos direcciones forman un ángulo entre ellas, dependiendo de la geometría de la hoja de mundo. Si cambiamos de sistema de referencia, es de esperar que estos ángulos no cambien. A esto se le llama simetría conforme.

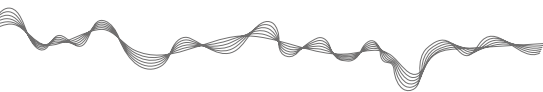
Al pasar al régimen cuántico, una simetría puede o no sobrevivir, es decir, que en una descripción cuántica, la simetría previa puede o



no seguir presente. En el caso de la cuerda y para la simetría conforme, esto no sucede. El problema con ello es que si la simetría conforme se destruye a nivel cuántico, dos cuerdas que deben producir las mismas vibraciones parecen ser ahora diferentes. Por ejemplo, habría diferencias entre tener una cuerda en cierta posición y rotarla por un ángulo. A ello les llamamos estados no físicos e implican que nuestro modelo es inconsistente. Sucede que existe una forma en que la simetría siga estando presente y así evitar la aparición de estados no-físicos y eso sucede cuando la dimensión del espacio-tiempo es diez.

El anterior argumento explica los orígenes de la restricción en el número de dimensiones, pero a pesar de ello no queda claro (a menos que se hagan los cálculos matemáticos) de dónde exactamente sale el número diez. Para ello presentaremos otro argumento, que a su vez implica una serie de cálculos que no vamos a presentar aquí, pero que esperamos que su omisión le permita al lector interesado tener una mejor idea de la razón de este número.

Tomemos una cuerda cerrada en un espacio-tiempo de D dimensiones. Cada punto de la cuerda debe estar asociado con un vector que no tenga masa. Para ello se requieren $D-2$ coordenadas. Por otro lado, como la cuerda es supersimétrica, esperamos también que cada punto de la cuerda se comporte como una partícula de espín $1/2$ en D dimensiones cuyas coordenadas sean reales (una partícula de espín $1/2$ puede tener coordenadas con números complejos, es decir formados de números reales e imaginarios). Si la teoría es consistente, el número de coordenadas reales que definen a la partícula de espín $1/2$ y al punto sobre la cuerda deben coincidir pues la supersimetría no debe distinguir entre bosones y fermiones. Resulta que una partícula de espín $1/2$ con coordenadas reales tiene como mínimo un número de coordenadas dado por multiplicar el número dos, $(D-2)/2$ veces. Este número es igual a $(D-2)$ únicamente para $D=10$.

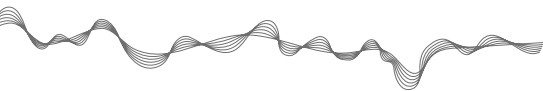


APÉNDICE 2: TEORÍA DE CUERDAS EN MÉXICO

Actualmente existe un grupo de investigadores trabajando en diversas instituciones en México, dedicados a la teoría de cuerdas y otros tantos interesados en tópicos comunes, usando herramientas utilizadas en teoría de cuerdas.

De entre los pioneros en trabajos directos con la teoría de cuerdas se encuentra el doctor Martín Ruiz Altaba, quien en la década de los noventa era profesor adscrito al Instituto de Ciencias Nucleares (ICN) de la UNAM, el doctor Héctor Hugo García Campeán, quien en 1998 regresaba de una estancia post-doctoral en el Instituto de Estudios Avanzados en Princeton, EUA, para incorporarse como investigador de tiempo completo al departamento de Física del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV-IPN) y el doctor Fernando Quevedo, investigador internacionalmente reconocido en el campo de la fenomenología de cuerdas, que trabajó de 1997 a 1998 en el Instituto de Física de la UNAM y que posteriormente se incorporara a la Universidad de Cambridge, en el Reino Unido y fuera director del Centro Internacional de Física Teórica (ICTP) en Trieste, Italia.

Al paso de un par de años, llega a nuestro país el doctor Alberto Güijosa, egresado de la Universidad de Princeton, EUA y la doctora Elena Cáceres, doctorada de la Universidad de

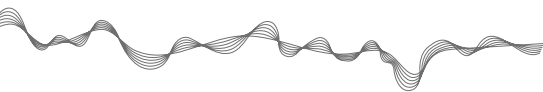


Texas. Así comienza un pequeño grupo de investigadores en teoría de cuerdas que se ve alimentado de los estudiantes que se incorporan y de investigadores en el área de gravitación y física de altas energías con relevantes carreras como el doctor Octavio Obregón en el entonces Instituto de Física, ahora División de Ciencias e Ingenierías de la Universidad de Guanajuato y el doctor David Vergara en el ICN.

Con el paso de los años, el grupo crece y nuevos investigadores se incorporan. Por ello en el año 2008 se organiza por primera vez una reunión especializada en cuerdas, fundada por Elena Cáceres, Héctor Hugo García Compeán y Alberto Güijosa, llamada Mexicuerdas, evento anual que a la fecha sigue organizándose. Además de Mexicuerdas, se organiza de manera bi-anual la Escuela Mexicana de Cuerdas y Supersimetría que comenzó en el año 2011, fundada por el grupo de investigadores en teoría de cuerdas de la Universidad de Guanajuato.

El grupo de físicos trabajando en México en el área de teoría de cuerdas ha crecido significativamente desde entonces. Actualmente, tenemos colaboraciones entre nosotros y con científicos fuera del país. La lista de investigadores trabajando en teoría de cuerdas o áreas afines que a la fecha se encuentran adscritos a alguna institución educativa de México, es la siguiente:

En la UNAM laboran Mariano Chernicoff, Antonio García, Alberto Güijosa, Myriam Mondragón, Leonardo Patiño, Saúl Ramos-Sánchez y David Vergara. En el departamento de Física del CINVESTAV tenemos a Héctor Hugo García Compeán y a Eloy Ayón Beato; mientras que en la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) se encuentra Román Linares. Fuera de la Ciudad de México contamos también con grupos dedicados a la investigación en teoría de cuerdas; aunque ahora labora en la Universidad de Texas, Elena Cáceres quien estuvo incorporada por muchos años a la Universidad de Colima sigue siendo una activa colaboradora, al igual que Ivonne Zavala desde la Universidad de Swansea en el Reino Unido, quien mantiene una relación estrecha de investigación con nuestra comunidad. En

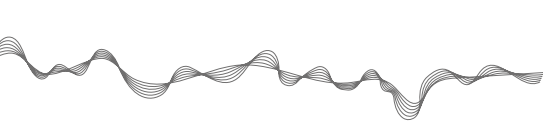


la Universidad de Guadalajara se encuentran Norma Quiroz, Roberto Santos y Aldo Martínez Merino; en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, se encuentra Alfredo Herrera y en investigación relacionada con la supersimetría y la teoría de campos a Lorenzo Díaz-Cruz.

Finalmente, el grupo de investigadores de la Universidad de Guanajuato, con quienes he tenido la oportunidad de trabajar, discutir y platicar sobre teoría de cuerdas, adscritos al departamento de Física se encuentran Nana Cabo Bizet, Gustavo Niz, Octavio Obregón y Miguel Sabido, y del departamento de Ingeniería Mecánica, César Damián.

Si alguno de las y los lectores se siente interesado en acercarse a cualquiera de estos grupos o si el interés radica en estudiar física y especializarse en teoría de cuerdas, les puedo asegurar que en cada persona que he mencionado encontrarán una cálida recepción y apoyo para continuar sus estudios. Transmitir el conocimiento, de manera informativa o curricular, siempre será parte de las actividades que nos hacen disfrutar de esta profesión.





BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA

Hay una gran variedad de libros de divulgación de ciencia en temas como la astronomía, la cosmología, la física de partículas y la teoría de cuerdas. La siguiente lista es solo una sugerencia personal.

Astronomía, cosmología y gravitación:

1. Hawking, Stephen W. (1988). *Historia del tiempo* (Traducción). México: Grijalbo.
2. Rodríguez, Luis Felipe (2005). *Un Universo en expansión* (4ª edición). México: FCE, SEP, CONACyT.
3. Wald, Robert M. (1982). *Espacio, Tiempo y Gravitación*, (Traducción). México: FCE.

Física de partículas y relatividad:

1. Einstein, Albert (1985). *El significado de la relatividad* (Traducción). Barcelona: Planeta-de Agostini.
2. Feynmann, Richard (2014). *Seis piezas fáciles* (Traducción). Barcelona: Editorial Planeta.
3. Oerter, Robert (2008). *La teoría de casi todo* (Traducción). México: FCE.
4. Weinberg, Steven (2020). *El sueño de una teoría final* (Traducción). México: Ediciones Culturales Paidós.
5. Weinberg, Steven (2016). *Los tres primeros minutos del Universo* (Traducción). México: Editorial Alianza.

Teoría de cuerdas:

1. Eldestein, José y Gilbert, Gastón (2016). *Cuerdas y Supercuerdas*. México: RBA editores.
2. Greene, Brian (2016). *El Universo elegante* (Traducción). México: Booket Paidós.
3. Greene, Brian (2017). *El tejido del cosmos* (Traducción). México: Ediciones Culturales Paidós.

Aunque no se trata de un libro de física, este libro describe de una manera muy clara la Mitología Azteca:

1. Tapia, Javier (2021). *Mitología Azteca*. México: Plutón editores.



Tu conecte con la ciencia

eUGreka: tu conecte con la ciencia es el programa institucional de comunicación de la ciencia de la Universidad de Guanajuato, que tiene como finalidad contribuir a la apropiación social de los avances científicos, tecnológicos y humanísticos en los que participa la comunidad universitaria. Con este libro inicia el proyecto editorial del programa, que responde al creciente interés de la sociedad por los temas científicos y de los investigadores por transmitir su pasión por el descubrimiento de una manera amena, favoreciendo así el placer de la lectura.



Óscar Gerardo Loaiza Brito es egresado de la Escuela Superior de Física y Matemáticas del IPN y del Doctorado en Ciencias en el Departamento de Física del CINVESTAV; realizó una estancia doctoral en el CERN y post-doctorales en el Instituto Tecnológico de Massachusetts, EUA y en la Universidad de Bonn, Alemania. Trabaja en el departamento de física de la Universidad de Guanajuato, es miembro del SNI nivel 2, de la AMC y fundador de la Escuela Mexicana de Cuerdas y Supersimetría. Ha enfocado su investigación a la teoría de cuerdas y a sus efectos en cosmología, partículas y gravitación.

UNIVERSIDAD DE
GUANAJUATO



Ediciones
Universitarias

