

AGUJEROS NEGROS Y ONDAS GRAVITACIONALES

UNA MIRADA PROFUNDA AL UNIVERSO

GERARDO HERRERA CORRAL



2019

Reseña

Una manzana cae, los planetas giran majestuosamente alrededor del Sol, el remolino de un agujero negro ejerce su atracción fatal (¡y es fotografiado directamente por primera vez!), diminutas ondas gravitacionales fluctúan en el tejido invisible del espacio-tiempo. Estamos ante distintas expresiones de la enigmática fuerza de la gravedad. ¿Cómo la entiende la ciencia desde Newton hasta Einstein, pasando por los intentos de descifrarla en la escala de la gravedad cuántica? ¿Cómo la retrata la literatura y el cine? ¿Qué reflexiones filosóficas nos despierta? En este libro Gerardo Herrera nos habla de uno de los descubrimientos científicos más importantes de este siglo, la detección de las ondas gravitacionales, así como de los agujeros negros, a los que están íntimamente ligadas. Empezando con las ideas de Galileo y Newton, el libro nos guía hacia la relatividad de Einstein, la curvatura del espacio-tiempo, los agujeros negros y las ondas gravitacionales. El autor nos lleva después por el camino de las teorías de unificación que intentan reconciliar la visión de Einstein de la gravedad con la mecánica cuántica, y nos introduce a los conceptos de la teoría de cuerdas y la gravedad cuántica. Finalmente, Herrera explora la relación de nuestras modernas teorías físicas con el cine y la literatura, para concluir con una visión filosófica sobre la naturaleza del tiempo y el destino del Universo. Este es sin duda un libro apasionante que nos habla de una de las grandes aventuras del pensamiento humano, que debe leer cualquiera que esté interesado

en entender los últimos grandes avances de la física, la cosmología y la astrofísica.

Índice

Prefacio

1. [La fuerza de gravedad](#)
2. [Neptuno, el planeta azul verde](#)
3. [Aristóteles, Galileo, Newton, Einstein](#)
4. [La teoría de la relatividad especial](#)
5. [La teoría de la relatividad general](#)
6. [La precesión de Mercurio y el doble amanecer](#)
7. [Objetos pesados en el cielo](#)
8. [Ondas gravitacionales: el comienzo](#)
9. [La danza de las estrellas: primera observación](#)
10. [La danza de los agujeros negros: primera observación directa](#)
11. [Confirmación y apogeo](#)
12. [El mensajero de las estrellas](#)
13. [Agujeros negros](#)
14. [El agujero negro en el centro de nuestra galaxia](#)
15. [Viaje al centro de la galaxia](#)
16. [El gran atractor](#)
17. [Las otras fuerzas](#)
18. [El origen de las fuerzas y la búsqueda de unidad](#)
19. [La quinta fuerza](#)
20. [La gravedad y el cine](#)
21. [La gravedad y la literatura](#)
22. [La gravedad y la filosofía](#)
23. [La gravedad y el fin del universo](#)

24. [La mirada profunda](#)

[Epílogo](#)

[Glosario biográfico](#)

[Glosario de términos](#)

[Referencias](#)

[Sobre el autor](#)

Prefacio

«Junto con mis colaboradores he llegado a la muy interesante conclusión de que las ondas gravitacionales no existen».

Albert Einstein¹

«Podemos escuchar ondas gravitacionales, podemos escuchar el Universo».

Gabriela González, 2016²

El 14 de septiembre de 2015 a las 5:51 de la mañana una extraña señal fue captada en las dos estaciones experimentales de la colaboración LIGO en los Estados Unidos de Norteamérica. Cinco meses más tarde se anunció la primera observación directa de ondas gravitacionales.

Las ondas gravitacionales son la manifestación definitiva de la gravedad. Es el fenómeno que viene a confirmar la visión moderna

¹ En 1936 Einstein le escribía a su amigo Max Born diciendo que junto con su colaborador Nathan Rosen había llegado a la interesante conclusión de que las ondas gravitacionales no existen. En 1938 Einstein llegó nuevamente a la conclusión de que estas perturbaciones del espacio-tiempo no existen. Einstein se equivocó en su análisis. Las ondas gravitacionales fueron detectadas en 2015 (Weinstein, 2016).

² Portavoz de la colaboración LIGO, durante una conferencia de prensa el 11 de febrero de 2016 (Dickerson, 2016).

que tenemos del espacio, el tiempo y de la manera en que actúa la interacción gravitatoria.

La Fuerza de Gravedad es una de las cuatro interacciones fundamentales de la naturaleza. Por sus características es difícil de enmarcar junto con las otras tres que se parecen más entre sí. La Fuerza Electromagnética, la Fuerza Débil y la Fuerza Fuerte se manifiestan en el mundo microscópico y dejan de ser relevantes donde la Fuerza de Gravedad domina.

La Fuerza de Gravedad es tan común como misteriosa. Es la interacción que nos resulta más familiar, y al mismo tiempo, se esconde en ella la clave que nos permitirá alcanzar el conocimiento completo y profundo del Universo. Este libro está dedicado a la Fuerza de Gravedad.

Nos acercaremos al fenómeno gravitacional de muchas maneras porque la comprensión científica de las cosas se aprecia mejor cuando se las mira desde distintos ángulos.

A lo largo del libro el lector encontrará recuadros que contienen información más precisa del tema que se está discutiendo. Los recuadros apoyan al texto acotando el contenido con información puntual y detallada pero no son imprescindibles.

Hemos incluido también un glosario de términos especializados y en algunas ocasiones aportamos referencias que no solo indican el origen de la información, sino que además representan la posibilidad de ampliar los conocimientos para aquellos interesados en profundizar en algún tema.

Usaremos a lo largo del texto números muy grandes o muy pequeños y por eso es conveniente la notación científica que consiste en representar al número en potencias de 10. Los números pequeños se representan con exponentes negativos y los grandes con exponentes positivos. Así, por ejemplo, 0.001 se representa: 10^{-3} mientras que 1000 se escribe: 10^3 . El exponente indica el número de ceros a partir de la unidad a la derecha (si el exponente es positivo) o el número de lugares a la izquierda (si el exponente es negativo). Con esta notación un número como: 0.0005 se denota: 5×10^{-4} .

La notación científica es una manera práctica de expresar magnitudes grandes o pequeñas. En la actualidad, esta manera de denotar cantidades está dejando de ser un rasgo exclusivo del lenguaje de las ciencias físicas para empezar a formar parte del lenguaje común. En ese sentido lo usaremos con la confianza de que se está convirtiendo en una forma cotidiana de expresar cantidades muy grandes y pequeñas.

Capítulo 1

La fuerza de gravedad

El espacio señala a los cuerpos, hechos de materia, por dónde moverse mientras la materia indica al espacio cómo curvarse. Este juego entre la materia y el espacio-tiempo es la Fuerza de Gravedad.

Shaquille O'Neal, considerado uno de los mejores jugadores en la historia de la NBA³, solía decir: «yo soy una fuerza de la naturaleza... jamás verás a alguien tan sexy moverse así en la cancha». El sentido connotativo de la palabra Fuerza es muy común, pero en la Física, la palabra Fuerza se refiere a un concepto concreto y bien definido. Las Fuerzas de la naturaleza son algo distinto de lo que Shaquille O'Neal se imagina.

Una Fuerza es lo que hace posible el cambio de estado de movimiento de un cuerpo. Esto es lo que aprendemos en la escuela sobre ellas. Según esto, aparecen Fuerzas de tensión cuando jalamos una cuerda y hay Fuerzas de fricción cuando arrastramos un objeto. Estamos rodeados de Fuerzas en nuestro día a día. Pero estas no solo cambian el estado de reposo o movimiento de un cuerpo, existen algunas que también pueden transformar las características del objeto sobre el que actúan.

³ NBA: National Basketball Association, por sus siglas en inglés, es la liga profesional de baloncesto en los Estados Unidos.

En este libro nos referiremos a Fuerzas fundamentales y con esto queremos decir que es a partir de estas que se derivan las más comunes, como son la Fuerza de tensión, la fricción, el empuje, etc. Las Fuerzas fundamentales son las que ya no pueden ser descritas en términos de otras. Existen en la naturaleza cuatro a las que nos podemos referir como Fuerzas primordiales. La gravedad es una de estas interacciones fundamentales de la naturaleza y aunque es la que más participa en nuestras vidas con su inevitable presencia en nuestras actividades cotidianas, el conocimiento que tenemos de ella es incompleto.

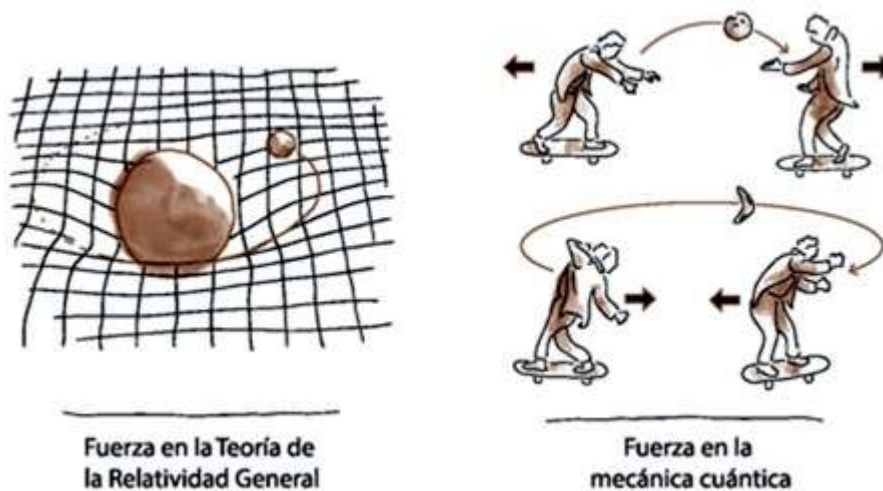
Siendo una de las Fuerzas primordiales del Universo y siendo en muchos sentidos diferente de las otras, la comprensión profunda de sus atributos es crucial en la búsqueda de una teoría unificada de todas las Fuerzas. Es decir, en la búsqueda de la Fuerza única de la que se derivan todas las demás.

La teoría que describe a la Fuerza Gravitacional es la Teoría de la Relatividad General, cuya idea clave está en ver al espacio y al tiempo como una geometría de cuatro dimensiones donde la presencia de masa induce curvatura.

Esta manera de entender a la gravitación como resultado de una deformación del espacio-tiempo hace que la idea misma de Fuerza sea prescindible. Podemos describir el movimiento en un campo gravitacional a partir de la geometría. No es necesario que intervenga un ente invisible llamado atracción que ejerce una acción a distancia.

De acuerdo con la Teoría de la Relatividad General, es justamente la geometría del espacio-tiempo lo que determina el movimiento de los cuerpos, pero a su vez son los cuerpos con masa los que determinan la geometría del espacio-tiempo (Wheeler, 1991). Esta relación entre la masa y el espacio-tiempo tiene consecuencias profundas. Así por ejemplo podemos entender que los efectos de la gravitación se transmiten de un cuerpo a otro a través de su geometría, pero además podemos prever la posibilidad de transportar energía gravitacional a través del espacio. Esto ha sido comprobado de manera observacional directa con la detección de ondas gravitacionales.

Sin embargo, tenemos otra manera de entender las Fuerzas en la física moderna.



Dos maneras de entender las Fuerzas en la física moderna. La Fuerza gravitacional en términos de geometría del espacio-tiempo (izquierda), las interacciones electromagnética, débil y fuerte como el

intercambio de partículas mediadoras (derecha). Estas tres pueden ser atractivas o repulsivas y son descritas por la mecánica cuántica.

La Teoría de la Relatividad General describe el mundo macroscópico donde los efectos de la Fuerza gravitacional son perceptibles, pero el mundo microscópico, donde operan tres de las cuatro interacciones fundamentales, es descrito por una teoría diferente a la que se ha llamado Mecánica Cuántica. Si la interacción gravitacional es el resultado de la deformación del espacio-tiempo, las otras tres solo pueden ser entendidas como el intercambio de partículas.

La idea de partículas intermediarias como portadoras de Fuerza surge de la interpretación de las matemáticas que explican al fenómeno en la mecánica cuántica.

La Fuerza gravitacional es la más débil de las cuatro interacciones y no obstante es la que gobierna la estructura y forma del Universo en su gran escala. En este ámbito de lo macroscópico la gravitación es central para entender la posible existencia y comportamiento de agujeros negros, la actividad de los pulsares y cuásares, y la propagación de ondas.

En la escala microscópica es importante entender cómo la Gravedad se relaciona con las otras Fuerzas. El origen del Universo y lo que ocurre en los agujeros negros nos plantean interrogantes sobre el comportamiento del espacio-tiempo en el mundo diminuto donde se fragmenta la energía y las interacciones.

Antes de tener la Teoría de la Relatividad General que da cuenta de la Gravedad con una nueva concepción de lo que es el espacio y el

tiempo, tuvimos la Ley Universal de la Gravedad que formuló Isaac Newton. Los efectos que predice la moderna Teoría de la Relatividad General son muy parecidos a los que describe esta teoría clásica cuando los campos son débiles o varían muy lentamente en el tiempo. Sin embargo, la Teoría de la Relatividad General de la gravitación predice nuevos fenómenos cuando los campos son intensos o varían con rapidez.

Para Isaac Newton la Gravedad era una Fuerza que actuaba entre los cuerpos atrayéndolos entre sí. Era algo invisible. Cuanto más grande la masa de los objetos mayor la Fuerza. Cuanto más cercanos más intensa la atracción entre ellos.

La observación de este comportamiento de la naturaleza representó un avance importantísimo en la comprensión de muchos fenómenos: explicó la órbita de los planetas alrededor del Sol y la de la Luna alrededor de la Tierra. Nos mostró también por qué los objetos caen como queriendo llegar al centro de nuestro planeta y nos explicó el movimiento de las mareas.

Durante muchos años esta idea de la Gravedad fue puesta a prueba y uno de los resultados más espectaculares de su universalidad y precisión fue el descubrimiento de Neptuno, el planeta más alejado del Sol en su momento⁴.

⁴ Neptuno es nuevamente el planeta más alejado del Sol después de que Plutón dejó de ser considerado planeta en el año 2006 por parte de la Unión Astronómica Internacional.

Capítulo 2

Neptuno, el planeta azul verde

En septiembre de 1846 se descubrió al planeta Neptuno. El hermoso astro azul verde fue descubierto con lápiz y papel y nos cuenta una historia de secretos envuelta en el silencio de los años. Su tenue brillo en la oscuridad del firmamento representa también al resplandor de la razón.

Crono sabía que su destino era ser derrocado por uno de sus hijos. Él mismo había depuesto a su padre de manera cruel y es por eso que, en un mórbido afán por evitar la fatalidad, devoraba a sus hijos en cuanto nacían. Cuando el sexto estaba por nacer, la madre Rea ideó un plan para salvarlo. Dio a luz a Zeus en secreto y le entregó a Crono una piedra envuelta en pañales que se tragó enseguida creyendo que era su hijo. Cuando nació Poseidón, Rea hizo lo mismo. Algunos dicen que en esa ocasión Rea simuló haber parido un potro que le dio a Crono. Luego hizo lo mismo con Hades. Los tres hermanos crecieron en un rebaño de corderos, ocultos a la mirada del padre. Cuando crecieron, el destino desplegó sus alas y levantó el vuelo. Zeus liberó a sus hermanos del vientre de su padre y el mundo se dividió en tres partes: el cielo y la tierra fueron para Zeus, Hades gobernaría en el inframundo y Poseidón en los mares. En Roma, el Zeus griego fue nombrado Júpiter, Hades pasó a llamarse Plutón y Poseidón se denominó Neptuno. Todos ellos surcan nuestro cielo sin cesar.

Neptuno no solo permaneció oculto a los ojos de su padre por mucho tiempo, cuando por fin tuvo el poder de escoger, decidió vivir en el fondo de los océanos. Fue esta elección de las profundidades marinas la que mantuvo a Neptuno por tanto tiempo lejos de las miradas, en un abismo de tinieblas.

Hace poco más de ciento setenta años que la distante mota de luz, antes vista con los ojos, pero no con la razón, apareció en nuestro sistema solar.

Cuando ya se conocía al planeta Urano, las mediciones más precisas de las órbitas de Saturno y Júpiter mostraban un comportamiento distinto al esperado. El principio con que opera la Gravedad nos dice cómo se mueven los planetas, pero en esta ocasión la previsión newtoniana no coincidía con la realidad. Esto colocó a los físicos ante el dilema de abandonar las ideas planteadas o de aventurarse en la búsqueda de una explicación que permaneciera fiel a lo conocido.

Fue entonces que el inglés John Couch Adams (1819-1892), por un lado, y el francés Urbain Le Verrier (1811-1877), por otro, pronosticaron la presencia y posición de un planeta hipotético. Si un objeto estuviese ahí perturbaría la trayectoria de sus compañeros desviándolos de su curso. Los cálculos predecían la existencia de un nuevo planeta

Neptuno fue encontrado en 1846 muy cerca de la posición calculada. En esta ocasión, como en muchas otras, el debate entre Francia e Inglaterra sobre la prioridad del descubrimiento fue intenso —hasta hace poco, cuando en 1998 salieron a la luz «los

archivos de Neptuno», que por muchos años habían estado perdidos— (Donoso, 2013).

Los documentos, encontrados en una ciudad de Chile, aclararon los hechos al mismo tiempo que revelaron una historia fascinante de reclamos de prioridad, pasión e intriga detrás del descubrimiento.

Fue la chilena Elaine Mac Auliffe quien, al embalar las pertenencias de un astrónomo recién fallecido en la Serena, Chile, se encontró con una caja llena de papeles debajo de la cama. Los archivos que Olin Eggen había robado del Observatorio Real de Greenwich fueron, por muchos años, un inusual tesoro de papel bajo su catre.

Estos viejos documentos con el sello real acabaron por mostrar que Adams había calculado la existencia de Neptuno con graves inconsistencias y errores considerables. Francia ganó así la controversia por vía de la precisión. La aparición de los archivos perdidos finiquitó la disputa secular y planteó la nueva pregunta ¿por qué robó Olin Eggen los archivos históricos?

Olin Eggen fue un gran astrónomo estadounidense. Había trabajado en el Real Observatorio de Greenwich entre 1963 y 1965 cuando fue despedido por su jefe el Astrónomo Real Richard Wooley. Algunos piensan que sustrajo los documentos por resentimiento derivado de pugnas internas. Cuando en 1996 se celebró el centésimo quincuagésimo aniversario del descubrimiento de Neptuno, Olin contestó a un par de cartas en las que se le preguntó sobre los archivos diciendo que él no tenía esos papeles. Entre los más de cien kilos de documentos que se encontraron en su apartamento

también tenía materiales del archivo newtoniano del siglo XVII, libros antiguos, ficheros, manuscritos y otros registros.

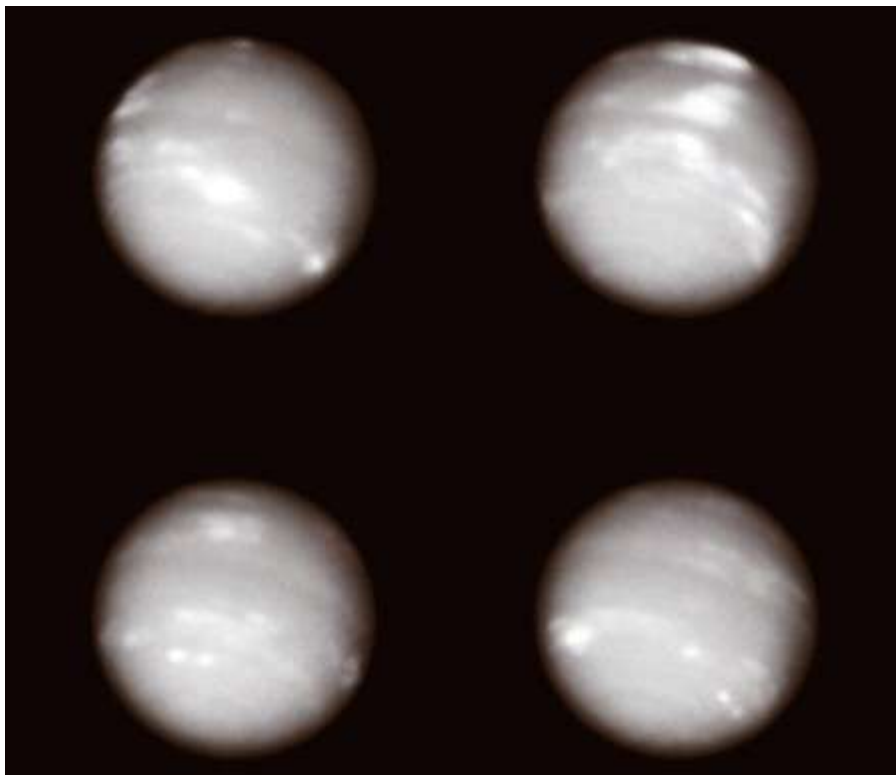
Cuando en 2011 se celebró el aniversario ciento sesenta y cinco del descubrimiento del planeta azul, el astro concluyó su primera vuelta al Sol desde que fuera visto por primera vez. En esta ocasión, el telescopio Hubble estuvo fotografiando al hermoso planeta durante dieciséis horas seguidas para darnos la vista completa de toda una rotación del globo.

Neptuno se encuentra a 4500 millones de kilómetros del Sol, es decir, treinta veces más lejos del Sol que nosotros. Esta distancia hace que la Fuerza gravitacional de nuestra estrella sea muy débil para Neptuno, por eso es que se mueve lentamente. El año en Neptuno dura 165 años terrestres.

En 2006 la Unión Astronómica Internacional definió a Plutón como un cuerpo más allá de los confines del Sistema Solar y Neptuno pasó a ser, nuevamente, el planeta más alejado —160 años después del descubrimiento de Neptuno los mortales en la Tierra decidieron que Plutón dejaría de ser un planeta en nuestro cielo para gobernar en el inframundo, donde aún vaga desterrado y cubierto por las sombras—.

La atmósfera de Neptuno está compuesta de hidrógeno y helio con rastros de metano que le dan el color azul vivo. Tiene un núcleo rocoso cubierto de hielo debajo de una atmósfera muy gruesa y densa. Hay quien piensa que las condiciones de presión y temperatura hacen que el metano forme cristales de diamante que se precipitan en una espectacular lluvia de gemas.

La historia de su descubrimiento es asombrosa por ser el primer planeta cuya existencia fue prevista con lápiz y papel. Los físicos vieron corroboradas sus ideas al nivel más alto que se pueda concebir. Esta hazaña del pensamiento generó gran entusiasmo y la exaltación del momento hizo pensar que el fin de la ciencia estaba cerca.



Imágenes conmemorativas tomadas por el Telescopio Espacial Hubble en 2011, a ciento sesenta y cinco años del descubrimiento del planeta Neptuno (NASA, 2011).

El éxito de Le Verrier en la predicción de la existencia de Neptuno lo incitó a proponer que algo parecido ocurría con la órbita de

Mercurio, el planeta más cercano al Sol que se movía de forma inesperada. Sus giros mostraban un sutil desplazamiento del perihelio en algo que se conoce como precesión. Animado con el juego de su juventud, Le Verrier predijo la existencia de un cuerpo masivo que perturbaba la órbita de Mercurio. Llegó a bautizar al misterioso planeta invisible con el nombre Vulcano, pero esta vez el planeta teórico nunca apareció.

Cuando habían pasado setenta años del descubrimiento de Neptuno, otra vez con cálculos matemáticos y sin necesidad de más planetas, el movimiento de Mercurio pudo ser entendido. Esta vez los físicos decidieron ser infieles a las ideas imperantes. En esta ocasión se corroboró toda una nueva manera de entender el espacio y el tiempo. No fue la lealtad con lo conocido sino la rebeldía en su contra la que acabaría triunfando para darnos la Teoría de la Relatividad General. La gravedad dejó de ser una Fuerza para convertirse en una deformación del espacio y el tiempo.

Una nueva manera de ver las cosas se estableció entre nosotros. Los nuevos conceptos resultaron ser tan brillantes como Neptuno, el planeta azul que emerge cada noche en un cielo tan oscuro como las profundidades del océano.

Capítulo 3

Aristóteles, Galileo, Newton, Einstein

Incluido en el index de las publicaciones prohibidas, el «Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo» escrito por Galileo contiene la conversación entre Salviati (Galileo) y Simplicio (Aristóteles). El italiano nunca pensó que esa conversación continuaría cincuenta y cinco años después con Newton y doscientos ochenta y tres años más tarde con Albert Einstein.

El polímata griego más influyente de todos los tiempos tenía una Teoría de la Gravedad. Desde que la formuló trescientos cincuenta años antes de la era común y hasta el siglo XVII cuando Galileo reflexionó sobre el tema, las ideas de Aristóteles (384-322 a. e. c.) daban una explicación al movimiento de los cuerpos. Según esta, el agua y la tierra se mueven de manera natural al centro del Universo mientras que el aire y el fuego se alejan de él. Así se explica que las rocas caigan y el humo suba. También explica que la Tierra, siendo el centro del Universo, sea redonda. De acuerdo con Aristóteles cada uno de los cuerpos tiene un lugar que está determinado por la «gravedad específica». Este hecho los hace moverse buscando la posición que le pertenece. De acuerdo con esto, los cuerpos más pesados caen más rápidamente buscando el reposo de su posición natural.

Aristóteles decía que lo más pesado está en el centro de la Tierra, que es también el centro del Universo. En su teoría geocéntrica, las

esferas del agua y la tierra están rodeadas por las esferas del aire y el fuego, donde los meteoritos y los cometas nacen y mueren. Alrededor de estas esferas se encuentran otras que contienen a la Luna, Mercurio, Venus, Sol, Marte, Júpiter y Saturno. La octava esfera contenía al firmamento de las estrellas fijas. Estas esferas etéreas eran como bóvedas de cristal que llevan arrastrando a los astros en movimiento eterno.

Galileo Galilei (1564-1642), cuestionó esta manera intuitiva de entender las cosas y para hacerlo realizó experimentos. De esta manera dejó para la posteridad un legado en tres piezas: un conocimiento más preciso sobre el movimiento de los cuerpos, la actitud crítica ante las ideas establecidas y un método experimental al aproximarse al comportamiento de la naturaleza.

Galileo mostró que los cuerpos al caer alcanzan el suelo en el mismo tiempo, independientemente de lo que estén hechos. Sus legendarios experimentos en la Torre de Pisa mostraron que existe una aceleración común para todos los objetos y que en la ausencia de aire o de factores que perturben la caída, estos llegarán al suelo simultáneamente. En contra de lo que Aristóteles aseguraba, no importa pues el peso de los objetos, estos llegan juntos al suelo. Esta observación, tan sencilla como parece, sería, mucho tiempo después, el «feliz pensamiento de Einstein». Más tarde volveremos a él, porque en este experimento de caída libre se encuentran los fundamentos que hicieron posible el nacimiento de la Teoría de la Relatividad General.

Isaac Newton resumió los estudios de Galileo, Johannes Kepler, Tycho Brahe y de muchos otros, formulando la Ley de la Gravitación Universal, según la cual los objetos se atraen de manera proporcional con la magnitud de sus masas. Esto quiere decir que cuanto mayor es la masa que los conforma mayor la atracción entre ellos. Esta Fuerza invisible entre los cuerpos es más débil cuanto mayor es la distancia entre ambos. Dicho en términos precisos: cuando estos se alejan la Fuerza disminuye y es posible saber exactamente cómo se reduce. La intensidad de la Fuerza decrece con el cuadrado de la distancia y uno puede calcular la magnitud de la Fuerza dividiendo el producto de sus masas por la separación que se multiplica por sí misma.

Newton invocó por primera vez la existencia de algo invisible que actúa a distancia y sin motivo aparente. La Ley de la Gravitación Universal fue publicada en 1687 en su libro *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* es decir, aproximadamente dos mil años después de que Aristóteles se refirió a la acción y el efecto del peso que los objetos de la naturaleza tienen.

Doscientos veinte años después, en 1907, Albert Einstein tuvo «el pensamiento más feliz de su vida», al darse cuenta de que cuando alguien cae de un edificio la Fuerza de Gravedad desaparece. Si la caída es en un elevador cerrado de manera tal que no vemos lo que ocurre afuera entonces podemos hacer algunas pruebas interesantes. Al caer no experimentamos el peso al que estamos acostumbrados y si soltamos un objeto de nuestras manos este flota junto con nosotros como si se le hubiese quitado el peso de encima.

Un observador externo verá que el cuerpo cae a nuestro lado, pero para nosotros flota en el aire porque la Gravedad ha desaparecido. En otras palabras: la aceleración a la que estamos sujetos mientras caemos libremente es equivalente a la Fuerza de Gravedad. Esta idea se conoce como el principio de equivalencia y fue el inicio de los trabajos que lo llevaron a desarrollar, en los años siguientes, la Teoría de la Relatividad General.

Capítulo 4

La teoría de la relatividad especial

«Tú no puedes ser luz para ti, no puedes, no puedes».

AGUSTÍN DE HIPONA

En 1905 Albert Einstein publicó un resumen de las ideas que desde hacía tiempo flotaban en el aire y que la gente llegó a conocer como Teoría de la Relatividad de Poincaré.

Henri Poincaré (1854-1912) había formulado el Principio de la Relatividad en un documento titulado *La medida del tiempo* (Poincaré, 2013) y también había planteado que la velocidad de la luz debe ser la misma en todas direcciones. Estos dos elementos son esenciales en lo que sería un nuevo marco teórico para entender el movimiento de los cuerpos en la ausencia de Fuerzas. El principio de relatividad de Poincaré establecía que «las leyes de los fenómenos físicos deben ser las mismas para todos, de modo que no podemos discernir si estamos en movimiento o en reposo». Poincaré siguió publicando y hablando de las ideas básicas de lo que un día llegaría a ser la Teoría de la Relatividad Especial, hasta su muerte en 1912.

En su trabajo titulado *Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento* Einstein no dio crédito a ningún trabajo anterior, aunque hace mención de Hendrik Lorentz cuando se refiere a los campos electromagnéticos. El marco teórico comenzó a llamarse Teoría de Relatividad y más tarde Albert Einstein introdujo la palabra «especial», llamándola Teoría de Relatividad Especial para

diferenciarla de la Teoría de la Relatividad General que habría de formular años más tarde.

Si una lámpara se mueve muy rápidamente la luz viajará siempre con la misma velocidad con que lo hace la luz que es emitida por una lámpara similar, pero en reposo. La luz que es emitida por la lámpara en movimiento cambia de color, es decir, la frecuencia de la luz cambia, pero su velocidad no.

Esta observación no es trivial. Cuando nosotros caminamos a cuatro kilómetros por hora (es la velocidad típica al caminar) arriba de un autobús y en la dirección en que se mueve viajando a veinte kilómetros por hora entonces alguien que está mirando desde la banqueta verá que nos estamos moviendo a veinticuatro kilómetros por hora. Esta suma de velocidades no ocurre con la luz.

Combinado con el principio de relatividad uno puede decir que la velocidad de la luz es la misma en cualquier marco de referencia que se la mida y por lo mismo es considerada una constante física fundamental.

Esto tiene una consecuencia crucial porque establece unas ecuaciones de suma de velocidades que no es la que conocemos en el mundo clásico en el que vivimos.

En nuestro día a día todo se mueve lentamente y por eso mismo sumamos las velocidades de los objetos de la misma forma como lo hacían los físicos antes de la Teoría de la Relatividad Especial. Si dos coches se acercan en direcciones opuestas, uno de ellos a una velocidad de veinte kilómetros por hora y el otro a treinta kilómetros por hora, entonces los conductores perciben que la velocidad del

otro es de $30 + 20 = 50$ kilómetros por hora. De la misma forma, una persona que camina en una escalera eléctrica en la dirección opuesta al movimiento de los escalones y con la misma velocidad que la banda permanecerá en reposo porque las velocidades se restan. Es necesario caminar más de prisa que la banda para poder bajar mientras los escalones suben. En otras palabras, las velocidades se restan por que uno camina en la dirección opuesta al movimiento de la escalera.

Sin embargo, cuando las velocidades crecen la suma no se puede hacer de esta manera tan sencilla. Cuando dos naves espaciales futuristas viajan a una velocidad cercana a la de la luz y en direcciones opuestas la velocidad que los pilotos percibirán no es más la suma simple. Con este hecho aparece un mundo nuevo, el relativista.

Desde que se dieron cuenta de esta curiosa peculiaridad de la naturaleza, los físicos comenzaron a hablar de física clásica para referirse al mundo en que vivimos, donde las velocidades son bajas. También se planteó una física relativista donde los objetos que se describen viajan a velocidades comparables con la velocidad de la luz. Los fenómenos a los que estamos acostumbrados en nuestro mundo pausado cambian cuando las velocidades aumentan. El tiempo se dilata cuando uno viaja en una nave a gran velocidad, los objetos se contraen y las velocidades se suman de manera singular, distinta a la manera como lo hacemos clásicamente.

El efecto de dilatación temporal es muy pequeño para alguien que viaja en un auto. Si lo hace a cien kilómetros por hora no veremos

que su tiempo se extienda de manera significativa. Si la persona viaja en un avión a más de mil kilómetros por hora durante un año entonces veremos que su reloj va más lento, tanto que en lugar de transcurrir un año veremos que para él han pasado un año más 3×10^{-5} segundos. Es una manera poco práctica y ecológica de prolongar la vida. Sin embargo, nosotros veremos que ha pasado un año mientras que alguien que viaja a una velocidad equivalente al 10 % de la velocidad de la luz habrá concluido su año apenas al año más cuarenta y cuatro horas. Si lo hace al 90 % de la velocidad de la luz su año se habrá extendido a 2.3 años. Para aquellos que viajen al 99.9 % de la velocidad de la luz tendrán un año tan largo como 22.2 años nuestros.

La contracción de los objetos cuando viajan a grandes velocidades tampoco es un efecto cotidiano para nosotros. Si viajamos en un carro a cien kilómetros por hora entonces nuestro cuerpo se encoge en la dirección del movimiento en una cantidad menor al tamaño de un protón. Si en cambio, usted pudiese viajar al 90 % de la velocidad de la luz adelgazaría 44 %, por lo menos en la dirección de vuelo.

Regresando a la adición de las velocidades hacemos notar que una consecuencia inmediata en la nueva manera de sumarlas es que nada puede viajar a una velocidad mayor que la de la luz. Aun cuando las naves se encuentren con velocidades muy cercanas la suma nunca alcanzará el valor de «c».

En el marco de la Teoría de la Relatividad Especial nada puede propagarse a una velocidad superior a la velocidad de la luz.

La luz se propaga en el vacío a 299,792,458 metros por segundo. Esta constante universal se simboliza con la letra «c», porque en latín velocidad se dice *celeritas*. No está mal asignarle la inicial de esta palabra, ya que tenemos muy buenas razones para pensar que se trata de la velocidad más especial en el Universo.

En términos más aproximados uno suele decir que la luz viaja a trescientos mil kilómetros por segundo y para los fines prácticos de los físicos es conveniente saber que la luz recorre un metro de distancia en 3.34 nanosegundos, es decir en 3.34 mil millonésimas de segundo. La luz tarda 1.28 segundos en llegar desde la Luna y le toma 8.32 minutos en llegar desde el Sol hasta nosotros.

La Galaxia más cercana a nuestro sistema solar está a la distancia que recorre la luz en veinticinco mil años. Se trata de Enana del Can Mayor, que fue descubierta apenas en el año 2003.

Con estas consideraciones en mente, uno puede pensar que si el Sol desaparece instantáneamente la luz que fue emitida antes de esfumarse deberá recorrer aproximadamente ciento cincuenta millones de kilómetros antes de llegar hasta nosotros. Esto significa que seguiríamos viendo al Sol en el cielo por ocho minutos antes de que la oscuridad cubriera a nuestro planeta. Esto lo sabemos desde hace tiempo. Lo que resulta curioso es que si el Sol se desvanece súbitamente la atracción gravitacional que ejerce sobre la Tierra también se extingue y entonces nuestro planeta saldría disparado por la tangente de su órbita, como lo hace un objeto atado a una cuerda cuando esta se corta mientras gira. Todos los planetas que

rotan alrededor del Sol se dispersarían al no ser más atraídos por la estrella que se evapora repentinamente.

De acuerdo con la Ley de la Gravitación Universal de Newton esto ocurriría en el mismo instante en que el Sol se difumina porque la acción a distancia que suponía Newton es instantánea. Esto significaría que la última luz en dejar al Sol demoraría ocho minutos en llegar, pero la Tierra y los planetas saldrían disparados al espacio exterior antes que eso. Esta posibilidad está en conflicto con la Teoría Especial de Relatividad porque si bien tenemos información lumínica que viaja a trescientos mil kilómetros por segundo, la información gravitacional no tardaría nada en ejercer o dejar de ejercer sus efectos. Ambos, la luz y la atracción gravitacional del Sol sobre la Tierra, surgen del mismo fenómeno y desaparecen juntos. O bien la Teoría Especial de Relatividad es incorrecta porque existe algo llamado Gravitación que viaja a una velocidad infinita o bien la Teoría de Acción Instantánea contenida en la Ley Universal de la Gravedad de Newton no es correcta. Albert Einstein y otros resolvieron este problema de una manera ingeniosa. Al hacerlo crearon una Teoría de la Gravedad que reemplazó a las ideas newtonianas de acción a distancia.

Capítulo 5

La teoría de la relatividad general

«La luz tiene energía y la energía es equivalente a la masa; en consecuencia, la luz también cae».

RICHARD FEYNMAN

En 1922 Einstein dio una charla en la Universidad de Kioto. Se dice que en esa charla comentó: «Estaba sentado en mi sillón de la oficina de patentes cuando de pronto se me ocurrió lo siguiente: cuando una persona se encuentra en caída libre no percibe su propio peso. Estaba asombrado. Este sencillo pensamiento me dejó muy impresionado. Me llevó en la dirección de una Teoría de la Gravitación» (Vaas, 2016).

Este sería el pensamiento más feliz de su vida, según lo expresó en 1920 mientras escribía una revisión para la revista *Nature* que, por cierto, nunca sería impresa porque los editores de la revista la consideraron muy larga.

«Para un observador que se encuentre en caída libre del techo de una casa no existe —por lo menos en su vecindad—, ningún campo gravitacional. Si el observador en caída suelta algunos objetos entonces verá que permanecen en reposo en relación con él».

Galileo lo había notado mucho tiempo antes y ahora llegaba el momento de usar un resultado observacional para comenzar a construir una nueva manera de entender la Fuerza de Gravedad.

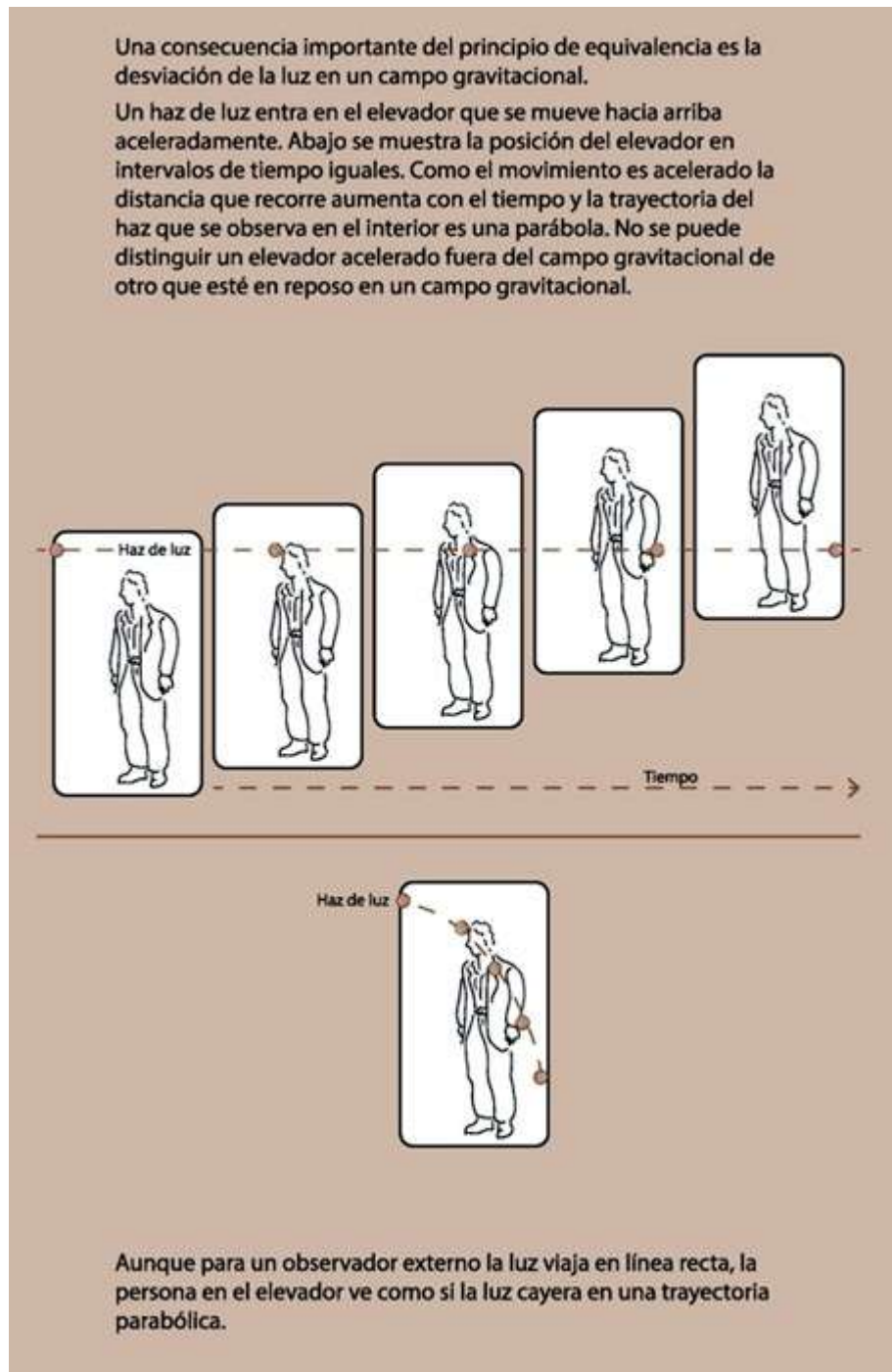
A partir de esta idea, Albert Einstein pudo notar que la luz se desviaría en un campo gravitacional y también concluyó que la influencia del campo gravitatorio en la luz cambiaría su frecuencia. Sin ir más allá de su pensamiento feliz pensó que los relojes deberían ir más lentos en un campo gravitatorio y no obstante consideró que todo esto sería difícilmente medible.

Dicho de manera simple el principio de equivalencia establece que la aceleración, que es el cambio incremental de la velocidad, produce el mismo efecto que la Fuerza de gravedad. Un elevador acelerado aparenta encontrarse en un campo gravitacional. Aunque normalmente los elevadores estabilizan su velocidad para que el usuario no sienta vértigo, si estuviéramos en el espacio exterior en ausencia de la Fuerza Gravitacional y nos encerramos en un compartimento que luego es acelerado a diez kilómetros por segundo, cada segundo entonces pensaremos que hemos llegado a la Tierra y que ahora sentimos la Fuerza de Gravedad cuando en realidad lo único que ocurrió es que estamos sujetos a una aceleración. Es decir: acelerar el compartimento en que nos encontramos es equivalente a estar en la presencia de un campo gravitacional (ver el recuadro).

Aunque uno piensa en la luz como algo sin cuerpo, intangible y sin masa, que debería estar exento de los efectos gravitacionales, la verdad es que no es así. La luz se desploma en la presencia de la Fuerza Gravitacional y el principio de equivalencia que acabamos de enunciar puede explicar de manera sencilla porque eso es así.

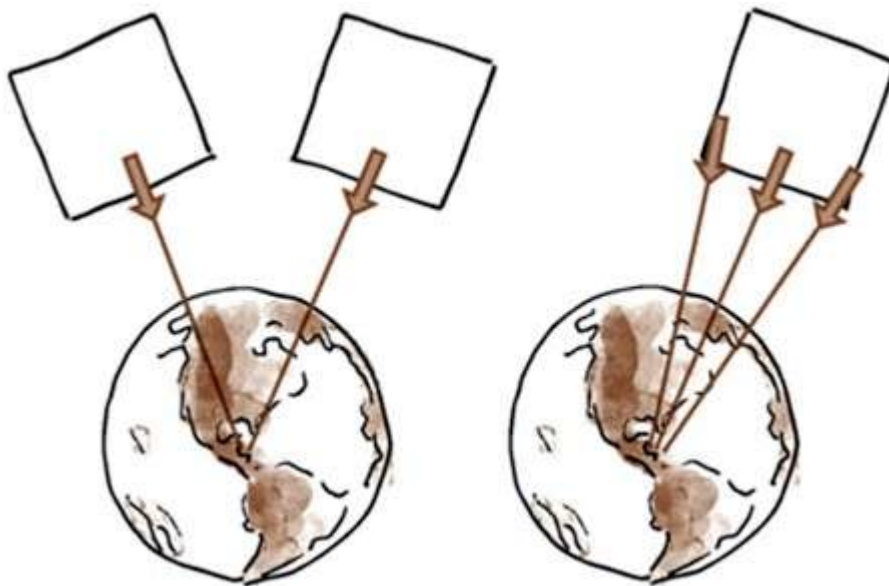
Cuando un haz de luz pasa por nuestro planeta cae con una aceleración de 9.81 m/s^2 . Lo que esto significa es que, si consideramos que en una centésima de segundo (es decir en 0.01 segundos) la luz recorre tres mil kilómetros, en esa distancia caerá aproximadamente 0.5 mm. Esto corresponde aproximadamente a la distancia que existe entre la Ciudad de México y Nueva York en línea recta —para ser exactos 3364 kilómetros—. Un láser enviado desde una de estas ciudades a la otra caería 0.5 milímetros por efecto del campo gravitacional.

Aunque el principio de equivalencia establece que las repercusiones de un campo gravitacional son indistinguibles de las que produce una aceleración, no es todavía claro cómo Einstein usó esto para relacionar la Gravitación con una geometría del espacio y del tiempo.



Antes de dar el siguiente paso, Albert Einstein y otros hicieron una reflexión adicional. Cuando dos cuerpos caen a la Tierra se acercan entre sí. Al dirigirse al centro de gravedad de la Tierra estos

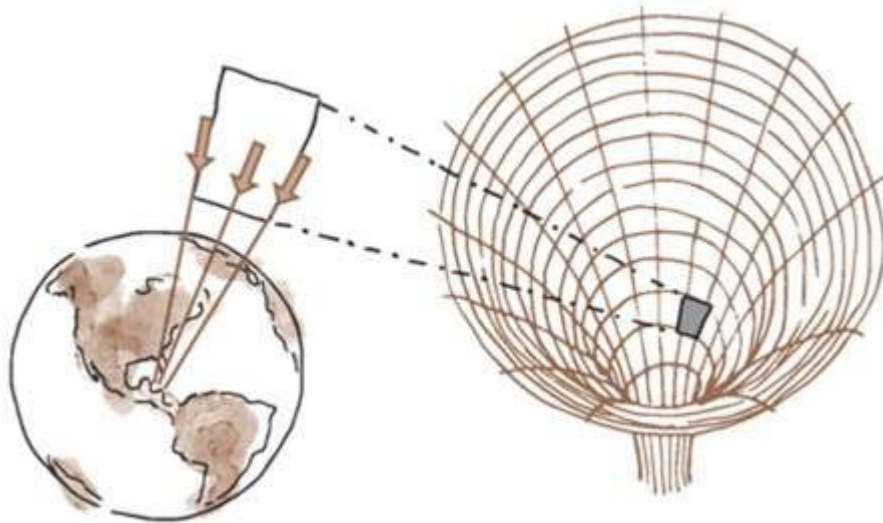
perciben una aceleración entre ambos, es decir un cambio de velocidad que va creciendo cuando más se aproximan al centro del planeta. La aceleración entre ellos es equivalente a una Fuerza de atracción. Si los dos cuerpos que se ven en la figura estuviesen dentro de un ascensor que cae libremente entonces el efecto de esta aceleración sería muy pequeño, pero si vemos a dos objetos separados por una distancia más grande entonces el efecto es mayor.



Efectos de marea. Izquierda: dos cuerpos que caen hacia el centro de la Tierra experimentan una Fuerza entre ellos porque se acercan cada vez con mayor rapidez (aceleración) y la aceleración es equivalente a una Fuerza. Un cuerpo que cae experimenta también una Fuerza que lo contrae aunque esta es pequeña porque el tamaño del objeto es pequeño comparado con la extensión de campo gravitacional de la Tierra.

Esto también es válido para un objeto en caída libre. Ya que el objeto tiene una extensión finita experimentará Fuerzas de contracción como se muestra en el lado derecho de la figura.

Los objetos cotidianos que estamos considerando como la cabina de un ascensor en el campo gravitacional de la Tierra no son muy extensos como para que estas Fuerzas sean perceptibles, pero son responsables de las mareas en los océanos⁵. Es por eso es que se usa el término «efecto de marea» para describir este fenómeno.



Analogía geométrica entre las Fuerzas de marea y la geometría de un espacio deformado.

⁵ Las mareas que experimentan los océanos se deben a la atracción gravitacional de la Luna. La Fuerza Gravitacional que existe entre la Tierra y la Luna hace que el agua de los mares se acumule en la dirección en que se encuentra el satélite, de la misma forma como la aspiradora levanta una alfombra suelta

El principio de equivalencia no explica los efectos de marea que se deben a estas variaciones pequeñas del campo gravitacional entre los puntos distantes de un objeto con un tamaño finito. Para poder ir más allá Einstein necesitaba de una teoría que explicara cómo es que el campo gravitacional de la Tierra afecta al objeto no solo en el centro de este sino además en su entorno (Wheeler, 1991).

¿De qué manera las Fuerzas afectan las diferentes partes de un objeto comprimiéndolo hacia el centro como se ve en la figura?

Einstein encontró analogías con la geometría. Pensó en la manera como se hacen las transformaciones en matemáticas para ir de un sistema de coordenadas a otro y notó como al hacerlo entran términos que no estaban antes en las expresiones matemáticas que se transforman. Finalmente llegó a la genial idea de relacionar las Fuerzas de marea con la curvatura de una superficie.

En 1907 Hermann Minkowski había desarrollado una geometría del espacio y del tiempo para describir la Teoría Especial de la Relatividad que ya Einstein había presentado en sociedad en 1905. Minkowski unió las coordenadas espaciales con el tiempo y generó una formulación geométrica de la teoría.

Herman Minkowski había sido profesor de Albert Einstein en Zúrich, Suiza, y fue el creador del concepto de espacio-tiempo que sería de gran utilidad en la formulación posterior de la Teoría de la Relatividad General.

Einstein formuló entonces una Teoría de la Gravedad usando el espacio-tiempo de Minkowski y curvándolo para describir las

trayectorias que los cuerpos describen cuando caen en un campo gravitacional.

Capítulo 6

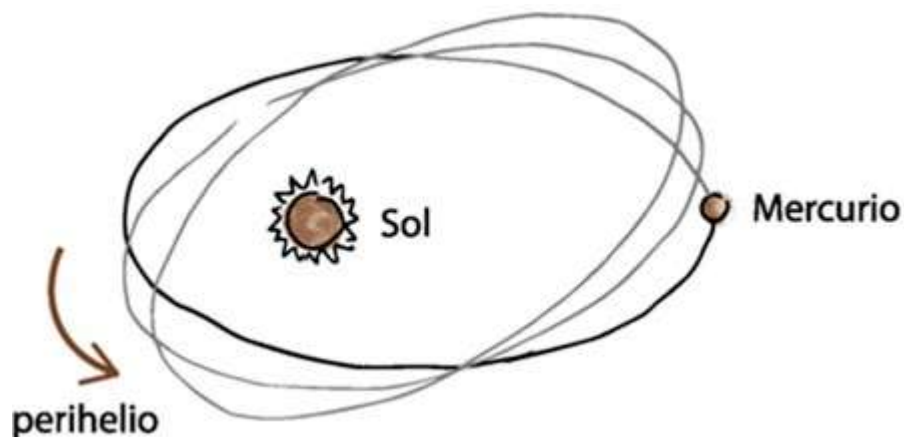
La precesión de Mercurio y el doble amanecer

«En un lejano planeta de un bizarro sistema solar»⁶, amanece dos veces cada día.

Muy poco tiempo después de que Newton publicara la Ley de la Gravitación Universal explicando las órbitas de los planetas, se notó que la trayectoria de Mercurio no encajaba con los cálculos. Esta discordancia fue atendida por Urbain Le Verrier —el astrónomo francés que había alcanzado la fama con su predicción de la existencia de Neptuno—. Como ya vimos, la destreza y precisión de sus cálculos concluyó en el descubrimiento del planeta más alejado del Sol en su momento. Como mencionamos previamente, para explicar el singular movimiento de Mercurio, Le Verrier hizo nuevamente estimaciones y propuso la existencia de un nuevo planeta al que llamó Vulcano. La presencia de un cuerpo cerca de Mercurio modificaría su órbita imprimiendo a este una precesión en su perihelio. Sin embargo, Vulcano nunca fue observado y los astrónomos propusieron entonces que una nube de asteroides o quizá grandes cantidades de polvo cerca del pequeño planeta eran la causa de las desviaciones en la órbita. Los años pasaron y los asteroides nunca aparecieron en el cielo.

⁶ La parte inicial de la frase procede del poema *Amigos del Universo*, de Arturo Benavides.

Mercurio es el planeta más cercano al Sol, no tiene satélites y su año dura ochenta y ocho días. Es más pequeño que nuestro planeta y las temperaturas en su superficie oscilan entre los 35 °C en el día y los -170 °C por la noche. Una peculiaridad de Mercurio es la de los amaneceres dobles. En algunas regiones del pequeño planeta, el Sol sale por la mañana, luego se detiene en el cielo y vuelve a ocultarse por donde había salido. Un poco más tarde, amanece nuevamente y entonces el Sol hace su recorrido usual para que los «mercurianos» hagan su día —que por cierto dura cincuenta y ocho días y quince horas de los nuestros—. En algunas partes del planeta se observa al Sol detenerse en el cielo, hacer un giro para luego continuar con su recorrido.



Perihelio es el punto de la órbita más cercano al Sol. La precesión de Mercurio es el cambio de dirección que experimenta el eje de rotación. Este se manifiesta en el movimiento del perihelio que va describiendo un círculo alrededor del Sol.

Esto ocurre poco antes de que Mercurio alcance su perihelio, que es la distancia más cercana del Sol a la que llega el pequeño planeta. Unos días antes de que esto ocurra, la velocidad de traslación de Mercurio iguala a la velocidad de rotación produciendo el fenómeno. Cuando Mercurio está en su perihelio la velocidad de traslación excede a la de rotación y cuatro días después todo vuelve a la normalidad.

El perihelio de Mercurio ocurre al siguiente año con un ligero desplazamiento, es decir, no acontece en el mismo punto que el año anterior, aunque la parte del corrimiento, que no se puede explicar en términos clásicos, es de apenas 42.98 segundos de arco cada cien años. Esto significa que se necesitan doce millones y medio de años mercurinos para que el perihelio describa una vuelta completa. Hoy sabemos que la causa de este efecto es inducida por la deformación del espacio-tiempo que predice la Teoría de la Relatividad General. La precesión correspondiente de nuestro planeta es mucho menor, de tan solo 3.84 segundos de arco.

Mercurio es difícil de ver. Aunque se lo conoce desde hace miles de años no fue hasta la década de los setenta cuando la visita de la misión Mariner nos dio imágenes de su superficie. En fechas más recientes se logró insertar en órbita la sonda MESSENGER que terminó sus observaciones en abril de 2015. Al finalizar su cometido, la nave fue impactada en forma controlada en el planeta. Ahora se ha lanzado una nueva misión llamada Bepi Colombo. Cuando llegue a Mercurio en 2024 estudiará muchos aspectos del clima, la geología y las características generales de este astro.

La explicación del movimiento de Mercurio fue el primer resultado de la nueva Teoría de la Gravitación. Einstein mismo mostró la explicación del movimiento de Mercurio en sus trabajos y ese hecho tuvo un gran impacto en la aceptación del nuevo marco científico. Curiosamente fue de nuevo la observación de los planetas la clave del éxito.

En esta ocasión la medición de los trazos que deja Mercurio en el firmamento significó un doble amanecer: el primer crepúsculo de la nueva mañana porque le dio a la Teoría de la Relatividad General un argumento convincente y el segundo crepúsculo de un nuevo amanecer porque nos dejó una imagen completamente distinta de lo que es el espacio y el tiempo.

Capítulo 7

Objetos pesados en el cielo

La diversidad no se limita a la vida en los mares, también está en la multiplicidad de formas que la naturaleza esculpe. La diversidad es una propiedad del Universo.

Las estrellas enanas marrones son poco conocidas. Su descubrimiento se demoró mucho porque son objetos poco visibles. Su existencia estaba prevista en los modelos astrofísicos, pero no habían sido vistas fuera del papel hasta que en la década de los noventa algunas observaciones dieron a los científicos la clave de su existencia real.

Las estrellas enanas marrones no cuentan con la masa suficiente como para producir reacciones nucleares como las que sí se dan en el centro de estrellas más grandes. Es decir, en ellas no se fusionan los núcleos de hidrógeno para producir helio y generar luz y calor. En cierta forma son planetas gigantes con masas de hasta veinte o setenta veces la masa de Júpiter. Los especialistas no se ponen de acuerdo en cuanto al origen de estos cuerpos celestes. Algunos piensan que en su historia tuvieron reacciones termonucleares en el interior, mientras otros consideran que son planetas que acumularon una gran cantidad de masa.

En nuestro sistema solar tenemos planetas gaseosos parecidos, aunque no llegaron a ser tan grandes como las estrellas enanas. La peculiaridad de las enanas marrones es que, estrictamente

hablando, no son estrellas, pero tampoco son planetas, aunque se parezcan a unos y otros.

Las enanas marrones brillan muy poco, quizá por el calor residual de posibles reacciones nucleares en su pasado o por la contracción de la materia de la que están formadas. La más cercana a nosotros está apenas a 6.5 años luz. Se considera la tercera más cercana después de Alfa Centauri que se encuentra en la constelación Centauro a 4.37 años luz de nosotros y de la estrella Barnard que está a 6 años luz de nuestro sistema solar.

La Teoría de la Relatividad General puede explicar la existencia de objetos muy pesados pero la acumulación de masa no es propiedad única de esta teoría. La Ley de Newton de la Gravitación Universal también pronostica la existencia de astros masivos y bien puede dar cuenta de ellos. Aquí hablaremos brevemente acerca de los objetos exóticos que habitan en el cielo, no porque estos sean una evidencia de la Teoría de la Relatividad General, sino porque además de ser interesantes también son laboratorios naturales donde la Teoría de Gravitación se pone a prueba.

Las estrellas de neutrones son objetos muy pesados. Estos cuerpos celestes son el resultado del colapso de las estrellas cuando el combustible en su núcleo se ha agotado. Su nombre delata la composición de estos fascinantes objetos: están hechos principalmente de neutrones con algunos otros componentes como protones, electrones, piones y kaones. Esto se debe a que las estrellas muy masivas generan una Fuerza gravitacional tan grande que al aplastarse se vuelven extremadamente densas, tanto que los

electrones de los átomos se fusionan con los protones para formar neutrones. Es como si los átomos se compactasen, eliminado todo posible vacío entre sus componentes. Lo que queda parece un inmenso núcleo atómico.

Un pedacito de estrella de neutrones del tamaño de un terrón de azúcar (Levy, 2012) pesa alrededor de cien mil millones de kilogramos. Los astrónomos han determinado que estos objetos exóticos tienen una corteza sólida con un espesor aproximado de 1.5 ó 2 kilómetros que está formado de hierro.

Como decíamos antes, el tiempo transcurre más lentamente en la presencia de un campo gravitacional intenso, de tal manera que en una estrella de neutrones la diferencia entre los relojes cerca de la superficie y relojes más alejados de ella es muy notable. Hay algunas estrellas de neutrones en que un reloj marcaría una hora en la superficie mientras otros alejados apenas cien metros de esta habrían marcado diez horas. En estos mundos uno bien podría hacer su jornada de ocho horas subiendo al piso de un edificio para regresar luego al suelo y contar con un día libre casi por entero.

El diámetro de una estrella de neutrones puede ser de veinte kilómetros y su masa de entre una y cinco veces la masa que tiene nuestro Sol.

Es posible que nuestra estrella termine como un objeto compacto del tamaño de nuestro planeta. A esto se lo conoce como «enana blanca». Un trozo del mismo tamaño que el terrón de azúcar pesará solo un par de toneladas. Típicamente, la Fuerza de gravedad en una enana blanca es cien mil veces mayor que en la superficie de la

Tierra. Las enanas blancas son las más abundantes en el Universo. Uno de los aspectos que ha fascinado a la gente desde su descubrimiento es el hecho de que son calientes al inicio de su formación, pero se van enfriando durante su vida de tal manera que el material que las compone en su interior se empieza a cristalizar, presumiblemente comenzando por el centro. Una de estas estrellas llamada BPM 37093A, descubierta en 2003 cerca de la constelación Centauro parece estar formada de carbono cristalizado. Según los cálculos de los astrónomos el objeto debe pesar unos 2,268 billones de trillones de kilogramos. Así, a tan solo cincuenta y cuatro años luz de nosotros tenemos un gigantesco diamante con muchos quilates y cuatro mil kilómetros de diámetro. ¿Porque obsesionarse por diamantes más pequeños?

Cuando las estrellas de neutrones giran a gran velocidad emiten pulsos de radiación. A estos se las conoce como pulsares.

Para poner a prueba la Teoría de la Relatividad General las observaciones se deben dirigir a los objetos más pesados. Son estos los que producen campos gravitacionales fuertes. Las estrellas de neutrones y los pulsares han sido los cuerpos que han proporcionado evidencia de los efectos previstos por esta teoría.

Capítulo 8

Ondas gravitacionales: el comienzo

Joseph Weber es un héroe trágico. Después de anunciar equivocadamente la observación de ondas gravitacionales pasó el resto de su vida defendiéndose de la comunidad científica. No vivió lo suficiente para ver el descubrimiento al que dedicó toda su vida, ni presenció su redención cuando LIGO lo reconoció como pionero (Popova, 2016) al anunciar la existencia de ondas gravitacionales.

Una consecuencia del modelo geométrico de la interacción gravitacional es el hecho de que cuando un cuerpo con masa no está en reposo o movimiento uniforme sino acelerado produce perturbaciones en el espacio-tiempo. Estas perturbaciones se propagan como ondas a la velocidad de la luz.

Las ondas gravitacionales se diferencian de otras ondas en algunos aspectos: no necesitan de un medio para viajar, como las ondas de sonido que se propagan en el aire, y a diferencia de las ondas electromagnéticas pueden atravesar la materia. Pueden pasar a través de planetas y de Galaxias enteras y, puesto que los objetos son transparentes para las ondas gravitacionales, al medirlas nos pueden dar información de los procesos que los originaron.

Sin embargo, la producción de perturbaciones en el espacio-tiempo requiere de grandes masas y procesos violentos. La explosión de una supernova en alguna galaxia cercana a la nuestra puede liberar mucha energía en un tiempo muy corto pero la perturbación que

imprime en el espacio-tiempo es tan pequeña que cambiaría la distancia entre el Sol y la Tierra en una distancia equivalente al tamaño de un protón.

Un pionero en la búsqueda de ondas gravitacionales fue Joseph Weber, quien comenzó sus investigaciones en los años sesenta con un cilindro de aluminio de dos metros de largo y uno de ancho. Su idea era que estas barras podrían eventualmente absorber la energía de una onda gravitacional y vibrar con su frecuencia.

Anteriormente Joseph Weber había estado en varias ocasiones en el curso de grandes acontecimientos, pero por alguna razón estos no se encontraron con él (Popova, 2016). Después de la Segunda Guerra Mundial, en la que participó activamente, fue contratado en la Universidad de Maryland como profesor. Entonces buscó a George Gamow cuando este predijo la existencia de un Fondo de Radiación de Microondas que provenía del Universo temprano. La Radiación Cósmica de Fondo se originó cuando el Universo tenía trescientos ochenta mil años. En ese momento la temperatura ya era lo suficientemente baja como para que los protones comenzaran a atrapar electrones formando los primeros átomos. Con esto, los electrones se desacoplaron de la radiación del plasma que fue liberada para constituir un ruido de fondo que está presente y podemos percibir.



El espacio-tiempo es un tejido que puede ser perturbado cuando un cuerpo con masa se acelera. Figura tomada de la referencia (Vaas, 2016).

Weber se propuso entonces dedicar su carrera a detectar esta radiación que sin duda proporcionaría valiosa información del origen del Universo. Sin embargo, Gamow lo desairó y más tarde dos ingenieros en electrónica descubrieron accidentalmente la Radiación Cósmica de Fondo, con lo que obtuvieron el Premio Nobel de Física.

Entonces Weber se encaminó hacia la física atómica y vio la posibilidad de construir lo que después sería el MASER. Esta denominación deriva del acrónimo en inglés: *Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*. Como su nombre lo indica, el MASER es un amplificador de radiación de microondas por emisión estimulada y es predecesor del láser que ahora se utiliza ampliamente.

Desafortunadamente para él, otros investigadores lo consiguieron antes y fueron reconocidos con el Premio Nobel⁷. Fue entonces cuando Weber vio en las ondas gravitacionales un campo de investigación posible en el que podría, por fin, ser el primero.

Después de muchos cálculos y un intenso trabajo de diseño construyó el primer detector de ondas gravitacionales, y en 1969 Weber anunció que había observado un evento. Aseguró que una onda gravitacional había pasado por el cilindro y que él había medido la diminuta vibración que dejó a su paso.

Un cilindro de aluminio como el de Weber pesaba una tonelada y media. Si una onda gravitacional lo atravesara en dirección perpendicular a su eje vibraría haciendo que la barra se alargase y luego se hiciera más corta. Weber había colocado cristales piezoeléctricos en la superficie del cilindro. Los cristales piezoeléctricos tienen la propiedad de generar una pequeña corriente eléctrica cuando se los somete a presiones o tensiones mecánicas. Existen cristales piezoeléctricos naturales y sintéticos; ambos son muy usados en diversas aplicaciones en las que es importante traducir un cambio mecánico en una señal eléctrica.

Estos cristales debían captar los cambios pequeños en el tamaño del cilindro generando una corriente eléctrica que era amplificada en cientos de miles de veces. Joseph Weber colocó otra estación a

⁷ Charles Hard Townes, Nikolai Basov y Alexandr Prokhorov, recibieron el premio Nobel en 1964 por su trabajo en el campo de la electrónica cuántica, que condujo a la construcción de osciladores y amplificadores basados en el principio máser-láser.

mil kilómetros de Maryland, en el Laboratorio Nacional de Argón, cerca de Chicago, para eliminar el ruido que pueden producir los eventos sísmicos o el ruido local de las actividades humanas. Un evento local no tendría por qué ocasionar una señal en el otro detector y podría ser descartado como ruido. En cambio, una onda gravitacional produciría una señal en ambos detectores.

Después de anunciar lo que él consideraba su primer evento de ondas gravitacionales, Weber se convirtió en una celebridad. Su rostro apareció en las portadas de las revistas, la NASA consideró la posibilidad de poner uno de sus detectores en la Luna y el prestigioso Robert Oppenheimer le dijo: «El trabajo que usted está haciendo es el más emocionante de los que se hacen hoy día en el mundo». Weber nunca olvidaría este comentario (Popova, 2016).

Los científicos del mundo entero comenzaron a construir aparatos como el de Weber, ansiosos por observar las ondulaciones del espacio-tiempo, que en aquel entonces tenían un carácter más esotérico que hoy. Desafortunadamente nadie logró detectar nada. En cambio, Weber creyó medir eventos que provenían del centro de la Galaxia en 1969, 1987 y 1996 (Vaas, 2016).

Por mucho tiempo se siguieron construyendo aparatos como el de Joseph Weber y pronto los diseños mejoraron en sensibilidad. Un incremento notable se consigue enfriando el cilindro a $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$. Con electrónica más fina y mejores métodos para analizar los datos se llegó a conseguir una sensibilidad tal que podría medir cambios en la longitud del cilindro del orden de 10^{-15} cm .

En el CERN (Centro Europeo de Investigaciones Nucleares) que actualmente aloja al acelerador más potente de todos los tiempos, el Gran Colisionador de Hadrones, se tuvo hasta hace poco tiempo el primer detector criogénico del mismo tipo de los detectores de Weber.



Joseph Weber con su detector de ondas gravitacionales en los años sesenta. Cilindro de aluminio de 150 cm de largo y 95 cm de diámetro. 1660 Hertz. Universidad de Maryland (1969).

Un detector criogénico es aquel que opera a temperaturas muy bajas. El sistema de enfriamiento lo conserva a temperaturas de

hasta $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ o menos. Los detectores de Weber enfriados de esta manera eran más sensibles que los que operaban a temperatura ambiente.

Pocos en el CERN sabían que en un silencioso pabellón se encontraba un contenedor cilíndrico de tres metros de longitud con una barra de aluminio en su centro. El aislamiento perfecto del mundanal ruido era esencial para la barra de metal cuidadosamente velada por docenas de sensores. Así eran, en los años ochenta, los detectores que buscaban escuchar lo que ocurre en el cielo.

El detector Explorer del CERN fue desmontado en 2009. Se lo conocía también como la «oreja cósmica» y por más de veinte años esperó una señal de la bóveda celeste, que nunca llegó. Una onda gravitacional habría producido vibraciones en la barra enfriada con helio a 2 Kelvin de la misma manera como lo haría el golpe de un martillo. Sin embargo, la sensibilidad del detector no fue suficiente para ver las señales que hoy sabemos que existen y son muy pequeñas. Cuando LIGO entró en funcionamiento en 2004, Explorer comenzó a contar sus días. El detector hoy es una pieza de museo en Cascina, Italia. Mientras tanto, LIGO celebra lo grandioso de un diseño espectacular capaz de sentir la menor vibración en los confines del Universo.

Joseph Weber nunca reconoció el error en su medición. Continuó por muchos años operando su laboratorio con sus propios fondos. Criticado por todos, se resistió siempre a admitir una equivocación en sus mediciones. Una mañana fría del año 2000, Weber fue a limpiar su laboratorio y accidentalmente resbaló con el hielo que

cubría el suelo frente al edificio, golpeándose la cabeza. Cuando se lo encontró inconsciente fue llevado al hospital, donde murió algunos meses después.

Al poco tiempo de que Weber anunciara su famoso evento en 1969, Joseph Taylor y Russell A. Hulse descubrieron un sistema de estrellas en rotación. Apenas habían transcurrido cinco años del controvertido anuncio de Weber cuando estos investigadores hicieron uso de la antena de Arecibo en Puerto Rico para detectar los pulsos de radio que emitía una estrella de neutrones. Taylor y Hulse pasaron cuatro años más estudiando el nuevo sistema binario cuando notaron que este giraba cada vez más rápido, pero con una órbita cada vez más pequeña. Esta peculiar danza de las estrellas es considerada la primera evidencia indirecta de ondas gravitacionales. No es posible explicar el cambio en la rotación del sistema sin que este emita energía que distorsiona el espacio-tiempo. Taylor y Hulse recibieron el Premio Nobel en 1993 por anunciar la primera evidencia indirecta de la existencia de ondas gravitacionales.

Capítulo 9

La danza de las estrellas: primera observación

Danzan por última vez y no saben que las están mirando.

La precesión de Mercurio fue la primera evidencia de que la nueva manera de entender las cosas que establece la Teoría de la Relatividad General es correcta. Después vendrían más mediciones para corroborar una y otra vez las predicciones de este nuevo paradigma. La más reciente evidencia es la observación directa de ondas gravitacionales, pero antes de que esto ocurriera se pudo observar el efecto que tiene la emisión de las ondas gravitacionales en la fuente que las origina. Como dijimos, a esto se lo consideró una observación indirecta y fue reconocida con el Premio Nobel en 1993 (Nobel Foundation Archive, 1993).

Joseph Hooton Taylor y su estudiante Russel Alan Hulse descubrieron y estudiaron un sistema binario que consiste en dos estrellas de neutrones. Este púlsar, conocido ahora como sistema Hulse-Taylor, fue observado por ellos en 1974 con la antena del Observatorio en Arecibo, Puerto Rico y sus dos componentes tienen 1.4 masas solares. Giran alrededor de un punto común en tan solo 7.75 segundos. Al observar al sistema rotante, Hulse y Taylor se dieron cuenta de que la distancia entre los cuerpos en rotación se estaba reduciendo debido a la emisión de energía, muy probablemente por la radiación de ondas gravitacionales. La órbita del sistema que Hulse y Taylor observaron se corre en 4.2 grados

por año, que es muchas veces mayor que el corrimiento que sufre Mercurio.

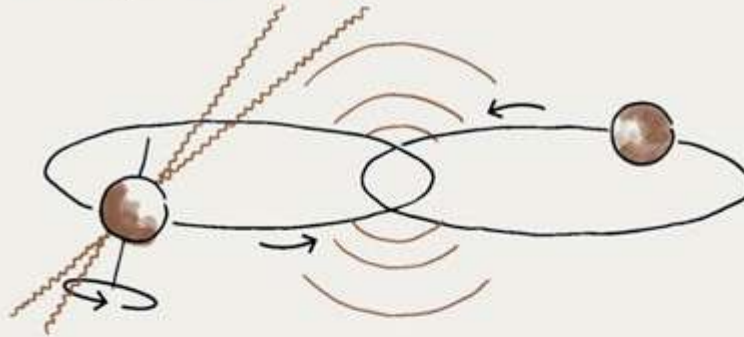
El pulso de radio que emite este objeto se recibe cada 59 milisegundos. Durante treinta años de observación, que van de 1975 a 2005, se pudo medir un cambio de treinta y cinco segundos en el periodo que define la distancia más corta de la órbita elíptica que el objeto de menor masa sigue alrededor del de mayor masa. Cuando la variación paulatina de esta distancia se grafica contra los años transcurridos, la forma de la curva reproduce exactamente la esperada por la Teoría de la Relatividad General.

Esta fue la primera evidencia indirecta de la existencia de ondas gravitacionales. En 2003 se descubrió un púlsar doble: PSR J0737-3039 con un periodo orbital de 2.4 horas. Este se encuentra a 1630 años luz de distancia de nuestro planeta. De nuevo se midió con gran precisión el decaimiento de la órbita en este nuevo sistema, constatando los resultados de Taylor y Hulse. Las observaciones con este nuevo sistema están entre las mediciones más precisas de la Teoría de la Relatividad General.

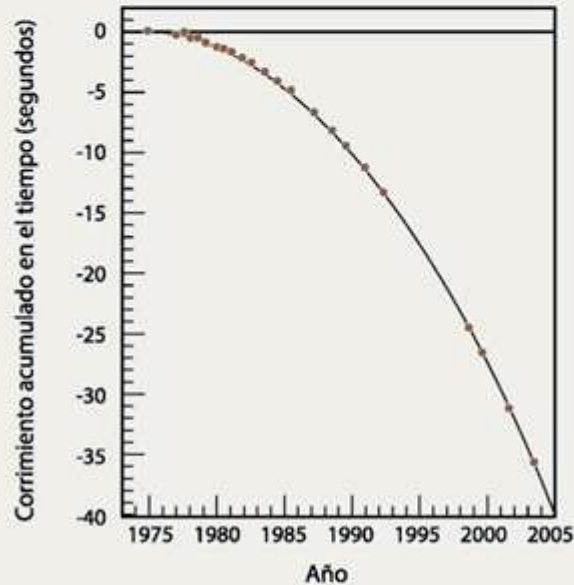
Como consecuencia de la pérdida de energía por la emisión de ondas gravitacionales la órbita de este sistema disminuye siete milímetros por día y por lo mismo terminarán fundiéndose en ochenta y cinco millones de años.

También ellas danzan por última vez y no saben que las están mirando.

El pulsar PSR J0737-3039 se encuentra en la constelación Águila, a veintín mil años luz de nosotros. Una de las dos estrellas del sistema binario es un pulsar (Nobel Foundation Archive, 1993), es decir, emite radiación pulsada.



Observación del tiempo de rotación del pulsar de Hulse-Taylor.



En el eje horizontal está el año de la medición. Los puntos son las mediciones mientras que la curva es el cálculo de la reducción en el tiempo de rotación que se obtiene de la Teoría de la Relatividad General asumiendo la pérdida de energía por la emisión de ondas gravitacionales (Nobel Foundation Archive, 1993).

Capítulo 10

La danza de los agujeros negros: primera observación directa

Desde hacía meses se venía rumorando lo que ese día, de manera oficial, en conferencia de prensa y de buenas a primeras, diría el director ejecutivo del laboratorio LIGO, David Reitze: «Hemos detectado ondas gravitacionales».

Mientras Hulse y Taylor estudiaban el sistema binario PSR J1915+1606, en los años setenta, Kip Thorne y Rainer Weiss conversaban sobre la posibilidad de detectar ondas gravitacionales de manera directa. Kip Thorne trabajaba en Caltech⁸ y por entonces reclutó a un experimentado físico británico llamado Ronald Drever (1931-2017). Ronald había contribuido ya de manera importante en el desarrollo de técnicas para la medición precisa de la Teoría de la Relatividad. Rainer Weiss, en MIT⁹, había sido uno de los que inventaron la técnica de medición de ondas gravitacionales por interferometría, que consiste en juntar ondas diferentes para ver la manera como estas se combinan dando otra que crece o se anula de acuerdo con la suma de las que la originan.

Por la naturaleza de sus programas de investigación, la Fundación Nacional para la Ciencia (*National Science Foudation*, en inglés) instó a los dos grupos a unirse en 1984 y así surgió el proyecto LIGO (*Laser Interferometry Gravitational Wave Obervatory*). Sin embargo,

⁸ MIT: Massachusetts Institute of Technology

⁹ Caltech: Instituto Tecnológico de California

el grupo tenía grandes problemas de organización, por lo que en 1994 se llamó a un nuevo director del proyecto. El físico de partículas elementales de Caltech, Barry Barish, con amplia experiencia en la organización de proyectos de Gran Ciencia, consiguió que los grupos de Caltech y MIT trabajaran juntos. La colaboración creció, la organización se hizo más sofisticada y las ideas comenzaron a tomar forma. La llamada Gran Ciencia surgió durante la Segunda Guerra Mundial y se consolidó después como la única opción para verificar algunas ideas científicas que requerían de grandes equipos, enormes construcciones y una organización sofisticada.

Para el físico teórico Kip Thorne, el cambio de estilo en el trabajo independiente al de una organización de personal en colaboración fue doloroso (Vaas, 2016), pero desde que llegó Barry Barish a la dirección del proyecto todo se desarrolló sin contratiempos.

Así se construyeron las gradas del teatro desde las que se contemplaría, veinte años más tarde, la danza fatal de los agujeros negros.

El anfiteatro del CERN no obedece a la etimología. No es un lugar donde se pueda ver el escenario por los dos lados, pero si es el lugar que ha reunido al mayor número de exaltaciones que rodean los anuncios de grandes descubrimientos científicos.

Un jueves por la tarde, en el invierno de 1983, se anunció ahí el descubrimiento del bosón W, responsable de la Fuerza débil. Esta es una de las cuatro Fuerzas fundamentales junto con la Fuerza electromagnética, la Fuerza fuerte y la Fuerza de Gravedad. El

anuncio presagiaba una llamada del comité Nobel en Estocolmo y efectivamente esta llegó al año siguiente. No era para menos, con ese descubrimiento se descifraba la naturaleza de una de las interacciones fundamentales al tiempo que ponía en claro que por lo menos dos de ellas: la Fuerza Electromagnética y la Fuerza Débil son aspectos de una sola Fuerza a la que se ha denominado Electrodébil.

También en un jueves por la tarde y en la mitad del invierno, se anunció, en la misma sala, uno de los códigos fundamentales de otra de las cuatro Fuerzas, la de gravedad. El 11 de febrero de 2016 se reportó en todo el mundo de manera sincronizada la detección directa de ondas gravitacionales.

No es resultado del trabajo que se realiza en el CERN, pero aquí se comunican casi siempre, de manera simultánea, los hallazgos del mundo de la física.

Las viejas butacas de madera plegables, una grada muy inclinada, los palcos que avanzan al frente y la pequeña plataforma escénica, todo se llena de gente que ocupa los escalones, los umbrales de las puertas, corredores y resquicios. En los andenes que rodean la galería se instalan los impuntuales. Desde ahí y en silencio intentan escuchar lo que se dice adentro mientras recuperan la imagen que ofrece la transmisión electrónica del evento con la computadora en sus rodillas.

Yo alcancé un lugar privilegiado a tres palmas del marco de la puerta abatible en el pasillo central. Así, mientras detenía para

otros el alerón izquierdo de madera escuché lo que tenía que decir Barry Barish, conocido del laboratorio por su membresía al gremio. Conozco a Barry Barish desde que nos encontramos en 1991 en Texas, Estados Unidos. Él acababa de ser nombrado portavoz de la colaboración GEM (por sus siglas en inglés: *Gammas, Electrons, Muons*) a la que me incorporé ya desde México justo después de mi regreso. GEM sería uno de los dos detectores que registraría las colisiones del *Super Conducting Super Collider* (SSC por sus siglas en inglés). Yo era un jovencito recién doctorado que creía que México debería participar en el experimento más ambicioso del mundo y eso es lo que el SSC, con el detector GEM, representaba. La construcción del SSC comenzó, pero al poco tiempo fue cancelado. Barry Barish buscó nuevos derroteros y encontró en LIGO la oportunidad de su vida.

Mientras Barry describía el trabajo de LIGO, todos imaginaban esas ondulaciones del espacio-tiempo, que se propagan como lo hacen las olas en el agua, alejándose de la perturbación que las originó. Si pudiéramos percibir estas ondas y una de ellas pasara por donde nos encontrábamos en ese momento, veríamos cómo la distancia entre nosotros se acortaría y se alargaría rítmicamente. No sería el efecto del movimiento producido por un esfuerzo corporal nuestro, sino el resultado de un evento lejano en el espacio y en el tiempo.

Existen varios detectores de ondas gravitacionales en el mundo, pero el aparato más sensible está en el observatorio LIGO. Consiste en dos estaciones construidas con la colaboración de mil participantes de dieciséis países.

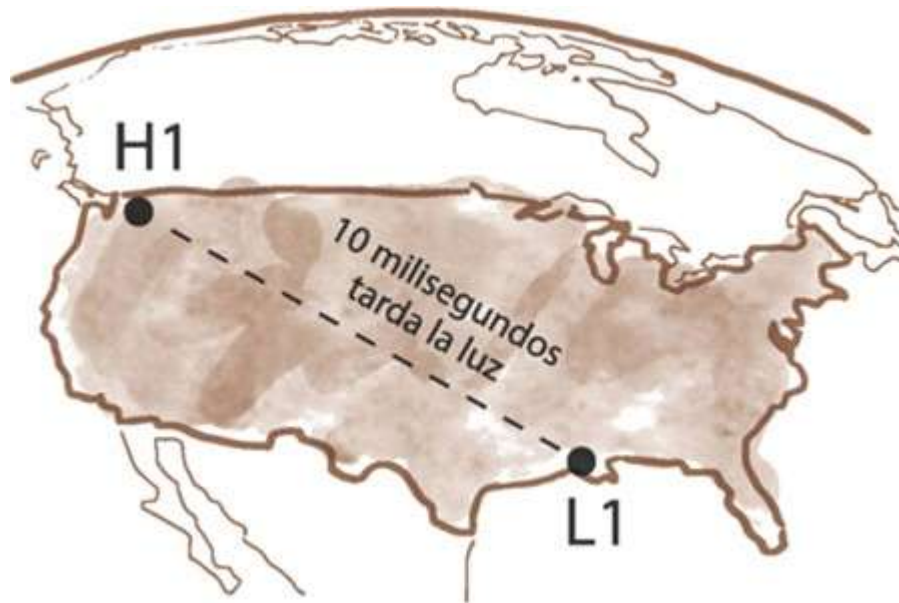
El experimento LIGO utiliza un instrumento en el estado de Washington y otro en Luisiana. Este último es un interferómetro con dos brazos en condiciones de vacío y una longitud de cuatro kilómetros cada uno. El de Washington es similar pero los brazos miden dos kilómetros.

Se conoce como interferómetro al aparato que obtiene información a partir de la perturbación que se produce cuando dos ondas típicamente electromagnéticas —como la luz— se juntan. Uno puede ver como el curso de una de las ondas se altera cuando la otra se interpone en su camino. La intensidad de la onda original cambia cuando otra onda se entrecruza con ella y a esto se le conoce como interferencia. Al aparato que se construye para ver con detalle los efectos de la mezcla de ondas se lo llama interferómetro.

Con la duplicación del arreglo se pretende identificar las falsas señales provenientes de perturbaciones sísmicas que solo dejaran señal en uno de ellos. Las dos estaciones están separadas por más de tres mil kilómetros. Una se encuentra en Hanford, al noroeste de los Estados Unidos, y la otra en Livingstone, cerca de la desembocadura del río Misisipi en la zona pantanosa junto a la costa del Golfo de México.

Una onda gravitacional modifica la longitud de los brazos, comprimiendo uno y alargando al otro, por una cantidad microscópica pero suficiente para producir un patrón de interferencia al momento de sumar la luz de los haces que van y vienen en dirección perpendicular. La colaboración LIGO aseguró, a través de un comunicado de prensa, que el arreglo experimental

puede revelar contracciones menores al tamaño de un protón, para ser precisos: diez mil veces más pequeño que un protón, es decir 10^{-19} metros.

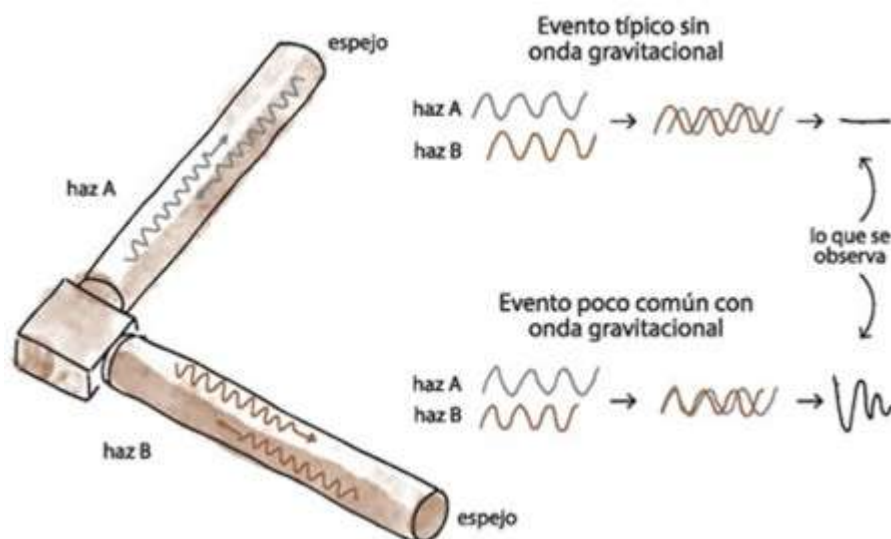


Posición de los detectores de la colaboración LIGO. Figura modificada de la página oficial de la colaboración LIGO (LIGO, 2017).

La señal captada la madrugada de 14 de septiembre de 2015 empezó con oscilaciones de treinta y cinco ciclos por segundo y fue aumentando hasta los doscientos cincuenta ciclos por segundo. Todo esto duró la cuarta parte de un segundo. Otros interferómetros del mundo, como VIRGO que se encuentra cerca de Pisa en Italia y el GEO600 en Hannover, Alemania no estaban operando ese día, por lo que no se pudo confirmar la llegada del pulso intergaláctico con mediciones alternativas.

El cambio de longitud para este evento fue de 4×10^{-18} metros en el detector. Esto es una milésima del tamaño de un protón.

Curiosamente, el experimento no había empezado aún a tomar datos cuando los sorprendió el breve sube y baja de la perturbación. La colaboración inició el 18 de septiembre el registro de fenómenos en modo de lectura. Tres días antes, ingenieros, técnicos y científicos estaban trabajando en la preparación del instrumento. Fue entonces que en medio de las pruebas registraron el pulso cósmico.



El experimento LIGO se basa en la superposición de dos haces de luz láser (haz A y haz B en la figura). Los haces son enviados en direcciones perpendiculares a lo largo de brazos de cuatro kilómetros de longitud. Cuando los haces se reflejan en espejos colocados en los extremos, se recombinan para que la diferencia en la fase revele la presencia de una onda gravitacional.

Después de veinte años de búsqueda y mejoras al detector, la colaboración envió para su publicación en una revista especializada el trabajo titulado: «Observación de ondas gravitacionales en la colisión de dos agujeros negros».

En este artículo se reporta que el 14 de septiembre de 2015 a las 5:51 de la mañana, sus dos detectores captaron la señal de una onda gravitacional. Por las características del evento debió tratarse de los rastros que dejó la fusión de dos agujeros negros localizados fuera de nuestra Galaxia. Las masas de los agujeros negros debieron ser de veintinueve y treinta y seis veces la del Sol, de manera tal que al unirse formaron un agujero de sesenta y dos masas solares. En el proceso se liberaron el equivalente en energía a tres masas solares. Esta energía fue emitida en ondas gravitacionales que llegaron hasta nuestro planeta la madrugada de ese día.

El artículo fue publicado en la prestigiosa revista *Physical Review Letter* y firmado por 1005 autores.

El detector es sensible a frecuencias entre treinta Hertz por lo bajo y diez mil Hertz por lo alto. Es decir que vibraciones por abajo de treinta oscilaciones por segundo no serán percibidas, de la misma forma que aquellas vibraciones que van y vienen más de diez mil veces por segundo no serán observadas. El oído humano puede escuchar frecuencias que van desde los veinte Herz y hasta los veinte mil Hertz aproximadamente, pero hay que tomar en cuenta que para el oído se trata de vibraciones en el aire. El detector LIGO es sensible a esas frecuencias de cambio del espacio-tiempo.

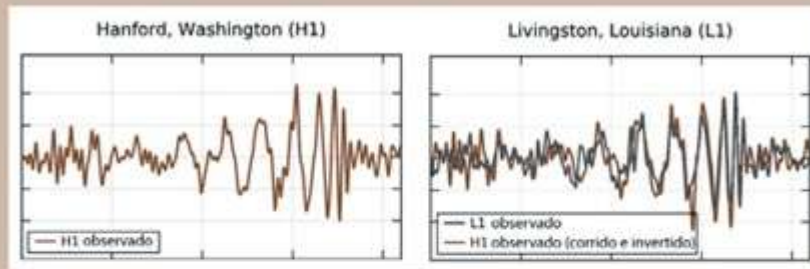
La colaboración está en proceso de hacer modificaciones para extender su sensibilidad a frecuencias aún más bajas de diez Hertz. Los ruidos locales se reducen de manera drástica porque los espejos que reflejan al haz están colgando en cuatro niveles, como péndulos múltiples: un péndulo que se desprende de otro y este a su vez de otro más y así sucesivamente.

Como decíamos, las ondas gravitacionales modifican la longitud de los brazos, comprimiendo uno y alargando al otro, de una manera microscópica pero suficiente para producir un patrón de interferencia al momento de sumar la luz de los haces que van y vienen en dirección perpendicular.

Para eso, los espejos del detector están pulidos a un nivel de precisión nanométrica. Aunque el nivel conceptual puede ser más complejo es útil, en ocasiones, pensar en la luz como formada por partículas llamadas fotones. Los fotones son la manifestación corpuscular del campo electromagnético (luz). Uno puede imaginarse a la luz láser que se utiliza en el detector LIGO como formada por multitud de fotones y para darse una idea de la precisión del aparato se puede decir que los materiales del espejo absorben solo uno de cada tres millones de fotones que el láser le envía.

El primer evento observado en LIGO fue denominado GW150914, por Gravitational Wave from the 14th of September, 2015.

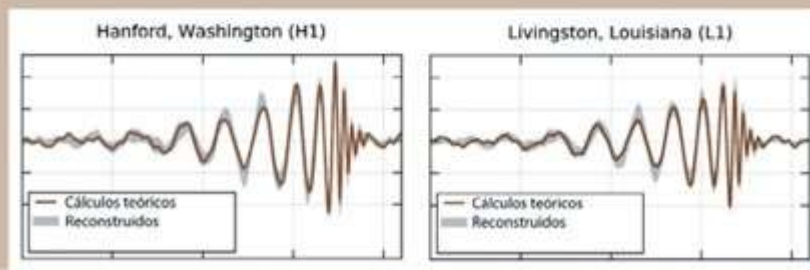
Las señales vistas en los detectores de Hanford (izquierda) en el estado de Washington y Livingston (derecha) en el estado de Luisiana se superponen en la imagen de la derecha para mostrar que corresponden al mismo evento.



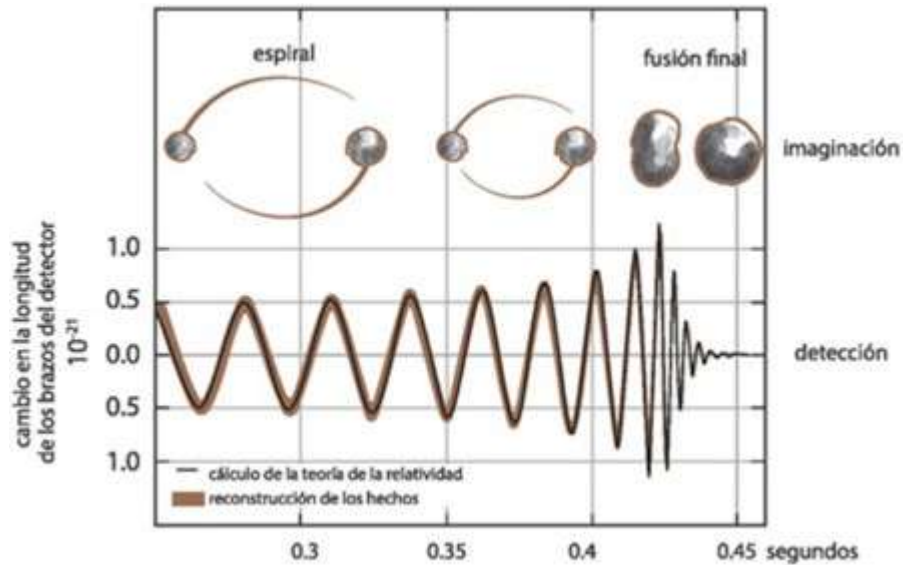
El evento llegó primero a Livingston y 6.9 milisegundos después a Hanford.

Para superponer las señales se ha corrido en el tiempo de retraso y se ha invertido para tomar en cuenta la posición de los detectores.

Abajo se muestra la señal simulada y proyectada a los detectores desde la Teoría de la Relatividad General. Es la manera como se esperaba ver en el detector una onda gravitacional proveniente de la colisión de dos agujeros negros con las masas especificadas en el texto.



Imágenes tomadas del sitio oficial de la colaboración (LIGO, 2017).



La línea café es lo que se observa en el detector como oscilaciones. Arriba una reconstrucción imaginativa de lo que está ocurriendo en cada momento. Los cambios que vemos en la señal de abajo se pueden entender como el encuentro entre dos agujeros negros que giran uno alrededor del otro en orbitas cada vez más cerradas para luego fundirse generando el final que se observa abajo. La figura es una modificación de la que ofrece el sitio oficial de la colaboración (LIGO, 2017).

La evolución del proceso de fusión de los agujeros negros está descrita en la figura.

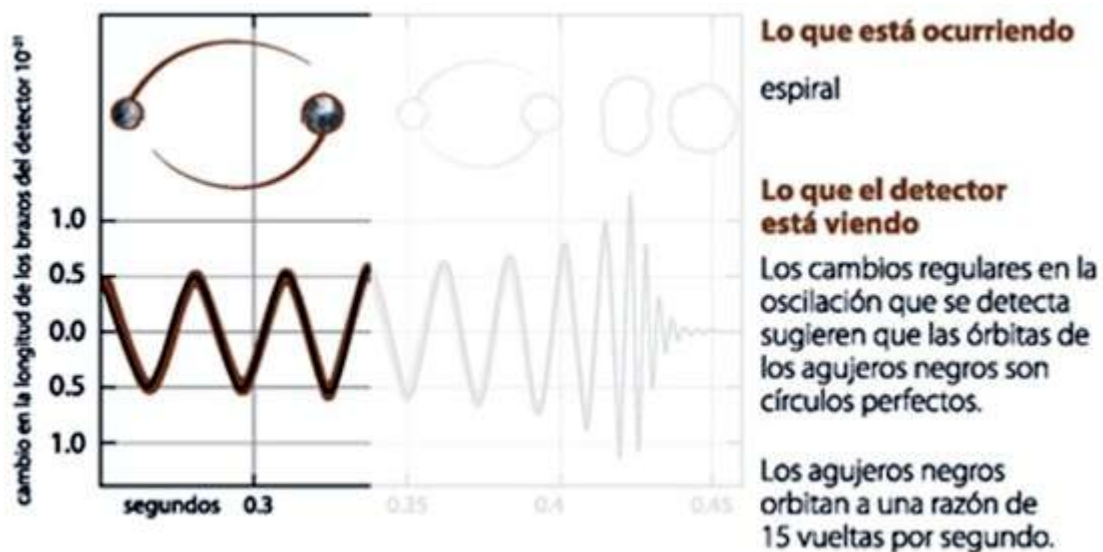


La fusión de dos agujeros negros esta precedida por una espiral entre ambos. A medida que se aproximan la espiral se estrecha. Aquí se muestra la emisión de ondas gravitacionales. Imagen tomada del portal de la colaboración (LIGO, 2013).

Cada paso de la última danza entre los agujeros negros está grabado en la forma de la señal. La onda gravitacional detectada en la Tierra nos da una imagen clara de lo que ocurría en el Cielo (Castelvecchi, 2016):

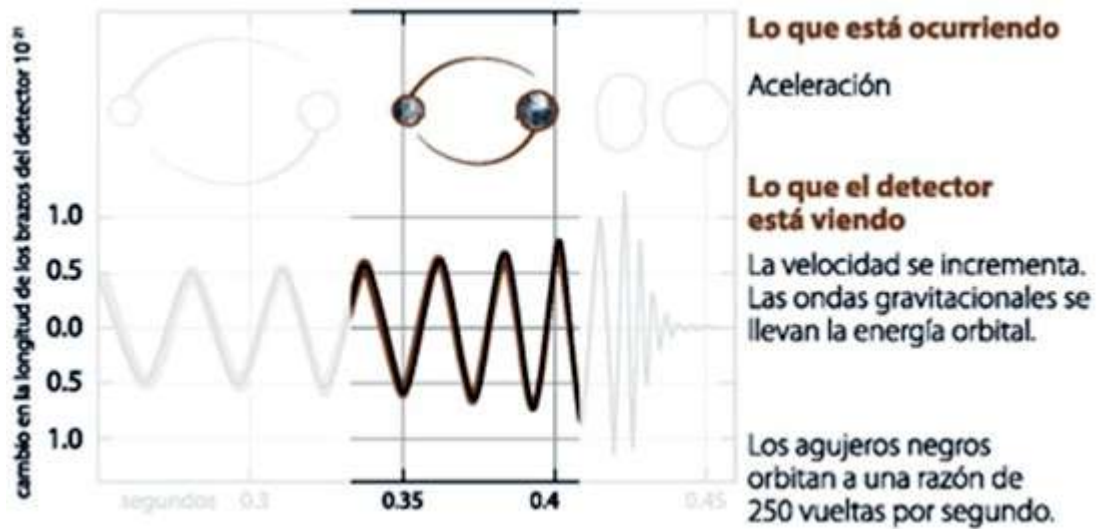
Paso 1:

La órbita de los agujeros negros es un círculo de aproximadamente 1,200 kilómetros de diámetro.



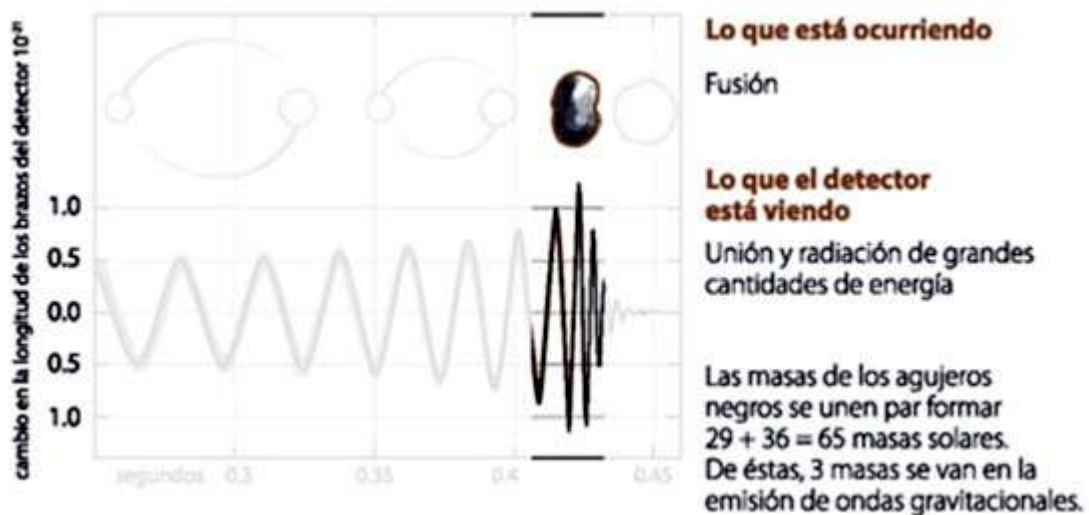
Paso 2:

El agujero negro con 20 masas solares tiene un diámetro de 174 kilómetros. El agujero negro con 36 masas solares mide 216 kilómetros.



Paso 3:

El momento de la fusión de los agujeros negros.



Paso 4:

El final del proceso.



El accidente astrofísico que detectó LIGO acabó con la existencia de dos agujeros negros para dar origen a uno solo. Debió ocurrir hace más de mil millones de años cuando, en nuestro planeta, la vida transitaba con dificultad de los organismos unicelulares a los multicelulares. La vida primigenia recorrió un largo camino desde entonces para agregarse, integrarse y desarrollar sistemas complejos que llegarán a construir un detector capaz de ver lo que ocurrió en el cielo en aquellos tiempos.

La colaboración LIGO anunció no solo la detección directa de ondas gravitacionales sino además la observación «indirecta» de agujeros negros, de sistemas de dos agujeros negros interactuantes (sistemas binarios) y, por si fuera poco, la fusión de estos en una explosión que perturbó al espacio-tiempo con una potencia descomunal.

Arriba hemos mostrado lo que el detector percibe como señal y a eso lo llamamos detección directa. Hemos mostrado también lo que nos imaginamos y a eso lo llamamos observación indirecta, esta es la manera como explicamos la señal medida.

La observación no es solo una confirmación de la Teoría de la Relatividad General, la reciente observación nos muestra muchas cosas: primero, la existencia de ondulaciones del espacio y del tiempo; después, una evidencia de la existencia de agujeros negros —que si bien están previstos en la teoría bien podrían ser objetos matemáticos sin realización en el mundo físico—; luego, nos ofrece una nueva herramienta para explorar el cosmos. Esta nueva manera de hacer astronomía nos dará una imagen nunca vista del Universo.

Por si todo esto fuera poco, la detección directa nos permitirá verificar si las ondas que observamos son de la forma prevista en el marco teórico, además de poner a prueba la naturaleza de los agujeros negros para examinar si estos son los objetos que surgen de las ecuaciones de la Teoría de la Relatividad.

Capítulo 11

Confirmación y apogeo

El espacio y el tiempo se deforman. El tiempo puede transcurrir más rápido o más lento en ondulaciones que lo comprimen y lo dilatan.

Las distorsiones del espacio y los cambios del tiempo de los que hablan los físicos no son los mismos que las percepciones y los sentimientos de los que hablan los psicólogos, aunque se atribuye a Einstein la explicación con base sensorial que dio a su secretaria Helen Dukas sobre la relatividad del tiempo: «Una hora sentado con una chica guapa en un banco del parque pasa como un minuto, pero un minuto sentado sobre una estufa caliente parece una hora» (Calaprice, 2015).

Esta es una descripción metafórica y no es precisamente lo que se está observando ahora como ondas gravitacionales, que realmente acortan y alargan los instantes de todos: los que están sentados en el parque al lado de una mujer hermosa y los que sufren sentados en una estufa.

El fenómeno que se anunció como observación directa de ondas gravitacionales representa un descubrimiento de gran importancia. Sin duda es uno de los avances más importantes en lo que va del siglo XXI. Las ondas gravitacionales alargan y contraen el espacio y el tiempo más allá de la impresión que un estado emocional nos pueda producir.

Una onda es por lo general el movimiento oscilatorio del medio mismo en que se propaga. El sonido es un ejemplo de ondas en el aire. Las ondas pueden también ser cambios en los campos eléctricos y magnéticos, como en el caso de las de radio o la luz misma. Las ondas gravitacionales, sin embargo, son cambios del espacio y el tiempo mismos.

Después de la primera observación de ondulaciones espacio-temporales en septiembre de 2015, se midieron más eventos. El 12 de octubre de 2015 de manera conjunta LIGO y la colaboración VIRGO observaron una señal de la colisión de dos agujeros negros con veintitrés y trece masas solares, que al fundirse emitieron 1.5 masas solares de energía en la forma de ondas gravitacionales; sin embargo, la señal no fue lo suficientemente robusta como para ser anunciada como descubrimiento. VIRGO es una colaboración con más de doscientos cincuenta miembros de diecinueve países europeos. El experimento se encuentra cerca de Pisa en Italia.

El 26 de diciembre del mismo año LIGO observó una nueva señal. Ese día el Reino Unido y algunos países que pertenecieron al imperio británico celebran el «Boxing Day», en el que se hacen donaciones y regalos a los pobres como parte de una tradición muy antigua. Es por eso que se llamó «evento de Boxing Day» a lo que ocurrió ese día en el laboratorio LIGO. Eran las 10:38 de la noche del 25 de diciembre en Estados Unidos, donde se localiza el experimento, y las 3:38 de la madrugada de Boxing Day en Gran Bretaña cuando el LIGO registró la segunda señal de lo que pareció

ser la fusión de dos agujeros negros situados a 1.4 mil millones de años luz de nosotros.

Regalo de navidad en Estados Unidos, regalo a los pobres en Inglaterra, el evento es el segundo en su tipo. Aunque muchas veces ser primero es lo que importa, en esta ocasión el segundo fue más importante porque vino a mostrar que no se trataba de un error. LIGO estaba observando ondas gravitacionales.

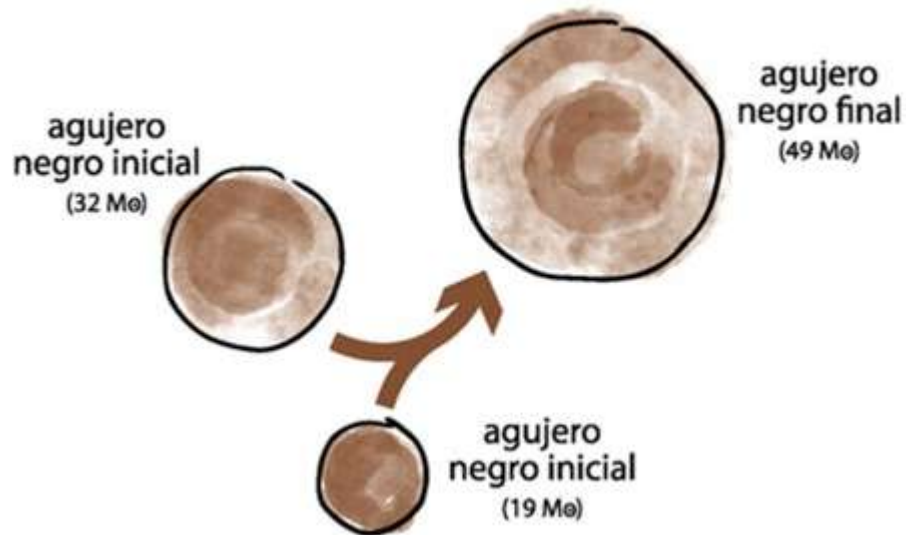
El primer evento observado en LIGO ocurrió el 14 de septiembre de 2015 y el estudio de ese pulso cósmico llevó a la conclusión de que se había originado en la fusión de dos agujeros negros a 1.3 mil millones de años luz. Por sus características se piensa que la fuente de este evento se encontraba en el hemisferio celeste sur, en dirección a las nubes de Magallanes. El evento del Boxing day, en cambio, llegó a los dos detectores casi al mismo tiempo. Hanford lo vio primero y tan solo 1.1 milisegundos después fue observado en Livingston. Esto significa que la colisión de los agujeros negros, en esta ocasión, debió ocurrir muy lejos, en un anillo equidistante a los detectores. La onda producida llegó por eso casi de manera simultánea. En este segundo evento los agujeros negros que pudieron originar las ondas gravitacionales son catorce y ocho veces más masivos que el Sol. El agujero negro que se formó en esta ocasión es de aproximadamente veintiún masas solares, lo que generó una señal más débil que la anterior, aunque más duradera. El evento de Boxing Day duró un segundo.

Otro aspecto novedoso del evento de diciembre de 2015 es que uno de los dos agujeros negros parecía estar rotando antes de fundirse con el otro.

Después de la observación del evento de Boxing Day, llegó uno más el 4 de enero de 2017. Este fue confirmado con una débil señal en el detector VIRGO.

La observación de ondas gravitacionales entró en una nueva etapa: la de colección de eventos que en mayor número permitirá entender mejor la formación de los agujeros negros, sus propiedades y el mecanismo más detallado de la colisión.

El 14 de agosto de 2017 se midió otro evento más de fusión de agujeros negros. En esta ocasión el detector VIRGO también vio la señal con la suficiente claridad como para anunciar su veracidad junto con la colaboración LIGO. Este era ya el cuarto evento y tuvo la peculiaridad de que con él se abrió la posibilidad de detección en red, es decir, la medición de manera simultánea en varios observatorios. Tres estaciones separadas lo vieron. Esto mejoró en forma considerable la posibilidad de ubicar en el cielo la fuente de la onda que en esta ocasión se encuentra a 1.8 mil millones de años luz de nosotros. El agujero negro que se formó tiene cincuenta y tres masas solares y está girando.



Evento del 4 de enero de 2017 en el que se muestra el tamaño relativo de los agujeros negros que se funden (Clavin, 2016).

Cuando las ondas gravitacionales pasaron por nuestro planeta los objetos que se encontraban de frente a la onda se alejaron unos de otros para luego acercarse y finalmente volver a la situación original. Pero no solo eso, el tiempo transcurrió más lentamente y luego avanzó con mayor rapidez para volver al ritmo en que vivimos. Las magnitudes de este cambio fueron imperceptibles a nuestros sentidos, pero detectables para LIGO.

Ya no había duda de que se estaba midiendo al tiempo en plena oscilación. Pudimos ver cómo se desenvuelve y sigue su curso, un instante después del otro, primero más lento y luego más rápido para estabilizar su flujo y regular nuevamente el transcurso de las cosas. De nuevo la física moderna mostraba que el tiempo es un lugar del mismo modo que el espacio.

Hoy sabemos que, junto con el espacio, el tiempo no es solo el punto en que habitamos, es también parte de los objetos que modifican a su vez el espacio-tiempo a su alrededor.



Arriba: detector LIGO en Hanford, estado de Washington. Abajo: detector en Livingstone, estado de Luisiana (LIGO, 2016).

Esta imagen física de lo que somos se confirmaba con la llegada de los eventos en que dos agujeros negros danzan hasta encontrarse. Ahora la colección de datos registrados describe un cielo poblado por objetos que antes no se veían. Sin embargo, lo mejor estaba aún

por venir y el 17 de agosto de 2017 hizo acto de aparición. El singular evento de ese día es un capítulo aparte.

Capítulo 12

El mensajero de las estrellas

«Multimensajero», es el nombre que muchos físicos dieron al espectacular evento detectado en agosto de 2017.

El 17 de agosto de 2017, tres días después de la observación conjunta de la fusión de dos agujeros negros, nuevamente ambos, LIGO y VIRGO, testificaron otro evento. Este evento fue muy especial porque se trató de la primera detección de ondas gravitacionales provenientes de la fusión de dos estrellas de neutrones. Sus masas eran muy cercanas a la masa del Sol y una de ellas tenía tan solo veinte kilómetros de diámetro.

Cuando una de las estaciones de LIGO captó la señal, el Gamma Ray Burst Monitor del Fermi Space Telescope detectó un chorro de rayos gamma. Es muy poco probable que se tratara de una coincidencia. Los rayos gamma son radiación electromagnética como la luz, pero con una energía mayor. Aunque su naturaleza es la misma, la radiación gamma no es visible. Los rayos X se parecen a los rayos gamma, pero tienen una energía un poco más baja que estos.

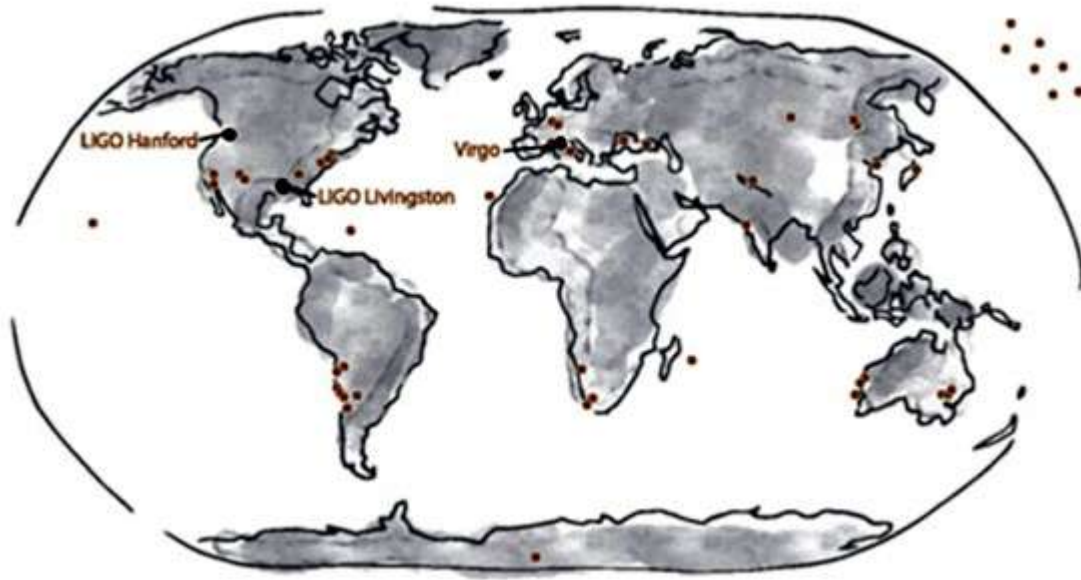
Al observar el evento los investigadores avisaron de inmediato a los astrónomos de todo el mundo para que estos enfocaran sus telescopios en la dirección del cielo de la que parecía provenir la onda. Así se pudo ver el insólito fenómeno en múltiples ventanas de observación para las que los diferentes aparatos astronómicos están diseñados.

Las imágenes obtenidas en radio ondas, en rayos X, ultravioleta, infrarrojos, en rayos gamma y en el visible de las ondas electromagnéticas provenientes de observatorios con base en Tierra y en el espacio han dado la vuelta al mundo. Esto representó sin duda el mayor espectáculo científico del año 2017.

Entre los muchos mensajes que llegaron hasta nuestro planeta, está el que nos muestra con claridad la formación de elementos pesados en ese violento escenario.

El observatorio Gemini, que consiste en un telescopio óptico infrarrojo de 8.1 metros de diámetro, el European Very Large Telescope y el Telescopio Espacial Hubble, pudieron ver la síntesis de elementos pesados —copiosas cantidades de platino, oro, plata, y elementos aún más pesados como el uranio fueron detectados en los restos de esta descomunal kilonova—. Con esta palabra se describe a los fenómenos astrofísicos de gran violencia en que dos estrellas de neutrones o bien una estrella de neutrones y un agujero negro se fusionan. Al observar la explosión se resolvió el misterio y las discusiones de muchas décadas alrededor del origen de los elementos pesados.

Cuando dos estrellas danzan hasta fundirse, rayos de luz, chispas doradas y fuegos de artificio lo celebran.



Observatorios en el mundo que participaron en el estudio del evento ocurrido el 17 de agosto de 2017. Los puntos negros señalan los observatorios de ondas gravitacionales mientras los cafés se refieren a otro tipo de instrumentos telescópicos. Imagen tomada de la página oficial de la colaboración LIGO (Chu, 2017).

El singular suceso fue visto en los cielos del hemisferio norte y tuvo lugar hace apenas ciento treinta millones de años en la Galaxia NGC 4993. Esta Galaxia elíptica se encuentra en la constelación Hidra, que es la más grande de las ochenta y ocho constelaciones modernas. Hidra se ve como una serpiente retorcida en el cielo. Es una de las constelaciones que estaba también en los catálogos de Ptolomeo. Los griegos conocían esta constelación culebra y construyeron mitos para enmarcar el espectáculo que ofrece su cercanía con la constelación cuervo y la constelación cráter.

En el choque de dos estrellas de neutrones la materia que las conforma se comprime, expeliendo una sopa caliente que alcanza temperaturas de más de diez millones de grados centígrados. En este caldo se encuentran los átomos más pesados de la tabla periódica de los elementos químicos.

El platino y el oro están entre los metales más caros del mundo. Un kilogramo de cualquiera de ellos cuesta más de mil dólares. Lo irónico es que en esta colisión de estrellas se produjeron el equivalente a cien planetas como el nuestro en oro y alrededor de quinientos planetas en platino puro. Su fabricación durante el choque de las estrellas debió haber tomado un segundo, quizá dos.

Pero eso no es todo, la inusual cita entre estrellas nos envió un mensaje más profundo. La emisión de ondas gravitacionales junto con la de ondas electromagnéticas en el mismo evento nos dio la posibilidad de determinar la constante de Hubble. Esta constante nos dice cuál es la velocidad con la que el Universo se está expandiendo. Cuanto más lejos esté el objeto, más rápido es su separación de nosotros y una Galaxia que se encuentre a 3.3 millones de años luz de distancia se aleja a setenta kilómetros por segundo aproximadamente. El problema es que, siendo más precisos para el valor de la velocidad de alejamiento, una de las mediciones nos da sesenta y siete y las otras setenta y tres kilómetros por segundo. Las mediciones más recientes del satélite Planck para este parámetro cosmológico son también las más precisas y nos dicen que las galaxias se alejan de nosotros con una velocidad de sesenta y siete kilómetros por segundo por cada

megaparsec de distancia que se les suma a los objetos. —Un megaparsec¹⁰ equivale a 3.3 millones de años luz de distancia—. Por otro lado, un análisis de las distancias de objetos de referencia arroja un valor de setenta y tres kilómetros por segundo por megaparsec.

El evento multimensajero arroja un valor entre 62 y 107 kilómetros por segundo por megaparsec (Chu, 2017), aún muy impreciso para resolver el problema del valor exacto. Sin embargo, la observación de más eventos como el que ocurrió en agosto pasado nos dirá cuál es la mejor medida.

Aunque parece solo un tema de especialistas, conocer el valor exacto de la constante de Hubble puede ser más valioso que todo el oro del mundo. Este número nos puede decir cuándo comenzó el Universo y quizá, cuándo terminará.

¹⁰ Un pársec equivale a 3.0857×10^{16} metros.

Capítulo 13

Agujeros negros

Los agujeros negros son los objetos astrofísicos más fascinantes del cielo. Por sus características han cautivado la atención no solo de los físicos sino del público en general, que los imagina como destino y fin del Universo.

Las estrellas son una acumulación gigantesca de gas formado principalmente por átomos de hidrógeno. Estos se congregan atraídos por la Fuerza de Gravedad y forman una esfera que se comprime por efecto de su propia masa. Cuando la presión en el centro de estos conglomerados alcanza un valor suficientemente grande, los átomos de hidrógeno comienzan a fusionarse para formar átomos de helio liberando una gran cantidad de energía. Esta energía escapa en la forma de radiación que contrarresta a la presión que la masa de gas ejerce en el centro de la estrella. El balance de esta presión es lo que mantiene a la estrella en equilibrio.

Para estrellas muy masivas la fusión de átomos puede generar elementos más pesados. En el centro de estas se forman carbono, neón, oxígeno, silicio y fierro. Este último es el elemento más pesado que se puede fabricar ahí. El fierro se va acumulando en el centro de la estrella hasta que su cantidad llega a un valor tal que empieza a colaborar de manera significativa con las Fuerzas gravitacionales. Esto termina por romper el equilibrio entre la presión que ejerce hacia afuera la radiación que se produce por la fusión de los átomos

y la presión de las grandes cantidades de masa que forman a la estrella. Entonces —en apenas una fracción de segundo— la estrella implota. El proceso termina con una explosión espectacular llamada supernova que produce destellos en el cielo. La luz en la oscuridad de la noche puede durar varias semanas o meses para luego disminuir y desaparecer. El resultado de todo esto puede ser una estrella de neutrones con las propiedades que discutimos arriba, o bien, si la masa es suficientemente grande, un agujero negro.

Albert Einstein nunca creyó en la existencia de agujeros negros y llegó a escribir un artículo que fue publicado en 1939 específicamente sobre este tema.

Algunos científicos continuaron con los razonamientos de Einstein en contra de la posibilidad de que existan agujeros negros en el Universo, y decían que nunca se llegarían a formar porque existe un límite para la energía gravitacional de una masa. Ese límite máximo está dado por la misma ecuación que ahora todos conocemos y que plantea la equivalencia entre masa y energía: la famosa ecuación $E = mc^2$.

Esta ecuación nos dice que cantidad de energía « E » se encuentra en una cantidad de masa dada « m ».

Una manera de razonar es que la energía que se requiere para generar un agujero negro es más grande que la energía contenida en su masa según esta ecuación. Por eso, este nunca llegaría a formarse en la naturaleza.

Al anunciar la detección de ondas gravitacionales, los portavoces del experimento LIGO dijeron que Einstein tenía razón porque sus

ecuaciones predican su existencia. Sin embargo, podrían haber dicho que no tuvo razón cuando publicó su trabajo en *Annals of Mathematics*, en el que negaba la posible existencia de los agujeros negros, ni cuando antes había negado la existencia de ondas gravitacionales también. Esto hubiera mostrado un lado más realista del quehacer científico en el que las equivocaciones también forman parte del concierto.

Kip Thorne, uno de los padres fundadores de LIGO y ganador del Premio Nobel por su participación en el experimento, comentó: «Los agujeros negros que chocaron para producir estas ondas gravitacionales, crearon una tormenta en la fábrica de espacio-tiempo. Esta observación prueba bellamente y con mucha fuerza ese régimen... y Einstein, sale con radiante éxito».

Thorne se olvidó de este insidioso capítulo en la vida de Einstein que, si bien escribió la ecuación que predice la existencia de ondas gravitacionales, no estaba de acuerdo con su existencia ni con la de los agujeros negros.

Albert Einstein publicó sus meditaciones al respecto. Se imaginó un objeto formado de partículas que tenían el potencial de convertirse en uno de estos objetos extremos. Estas partículas se moverían en órbitas circulares alrededor del centro común formando una esfera. Einstein razonó entonces que hacer esta esfera cada vez más pequeña tendría la consecuencia de que la atracción gravitacional sería cada vez mayor. Para poder contender con la Fuerza gravitacional las partículas se moverían a una velocidad cada vez mayor. Los cálculos que hizo mostraron que hay un punto en que la

gravedad sería tan fuerte que las partículas se moverían a una velocidad mayor que la de la luz y puesto que nada se puede mover a una velocidad superior a la de la luz entonces el arreglo de partículas no alcanzaría nunca el tamaño crítico. Entonces escribió: *«El resultado esencial de estas investigaciones es que las singularidades de Schwarzschild no existen en la realidad física».*

Aunque los cálculos eran correctos Einstein no consideró la posibilidad de que la Fuerza de Gravedad fuera tan grande que pudiese sobrepasar la «Fuerza centrífuga» de sus partículas hipotéticas hasta provocar una implosión. Einstein no pensó en la posibilidad de que ocurriera la reducción brusca del tamaño de un astro y por eso su predicción fue incorrecta.

Implosión es la palabra clave en la formación de un agujero negro. Una explosión expande mientras que una implosión comprime. En objetos masivos la presión gravitacional en el centro puede ser tan grande que ni la repulsión debida a la carga eléctrica de las partículas, ni la impenetrabilidad de estas resiste la Fuerza que las aplasta. La Fuerza gravitacional podría llegar a ser tal que los electrones se unen a los protones para formar neutrones. Si la Fuerza gravitacional es grande la resistencia de los neutrones acaba cediendo y viene un colapso. La implosión de la estrella comprime el centro a densidades extremas y entonces las leyes de la mecánica cuántica y la curvatura del espacio-tiempo actúan para formar un agujero negro. El objeto que se forma se separa del resto del Universo.

En estos objetos se concentra una gran cantidad de materia en un volumen pequeño. En el centro del agujero negro se forma una singularidad de la que sabemos muy poco. Presumiblemente la Fuerza de gravedad es infinitamente fuerte en esa zona del espacio-tiempo en la que las magnitudes físicas no pueden definirse. La materia que caiga en la influencia de su campo gravitatorio es atraída y no podrá más salir de él. Ni siquiera la luz puede escapar de un agujero negro.

La observación de ondas gravitacionales por el experimento LIGO es también evidencia indirecta de la existencia de agujeros negros y aunque hay otras razones para pensar que estos objetos existen la más reciente es quizá la más estrujante.

Desde la década de los sesenta se tiene evidencia indirecta de la existencia de agujeros negros. La más importante se refiere a sistemas binarios en los que se puede ver a una de las estrellas girando alrededor de algo que no se ve. Cignus X-1 en la constelación del Cisne, es el ejemplo más conocido en este tipo de estudios. Consiste en una estrella azul gigante con treinta masas solares que orbita alrededor de un compañero invisible que parece emitir rayos X. Si se trata de un agujero negro entonces no es él mismo quien emite este tipo de radiación sino la materia acelerada que está cayendo en él. Esta materia está compuesta de gas y plasma con temperaturas de millones de grados formando un disco alrededor del objeto. Los cálculos indican que este debe tener entre ocho y diez masas solares. El sistema fue descubierto en 1964 y después de muchos estudios se lo llegó a considerar una evidencia

de agujeros negros en el Universo (Bowyer, et. al. 1965). Cuando se analiza la luz que emite la estrella azul se observa un corrimiento debido al efecto Doppler¹¹ y eso permite calcular el periodo de rotación que para el sistema es de 5.6 días alrededor del supuesto agujero negro.

Otro candidato para ser agujero negro se encuentra en la Nube de Magallanes. La Nube de Magallanes¹² consiste en dos Galaxias cercanas a la nuestra. Una de las dos es llamada Gran Nube de Magallanes y está a ciento sesenta mil años luz mientras que la otra, llamada Pequeña Nube de Magallanes, está a doscientos mil años luz. Ahí se encuentra un sistema de dos objetos en el que uno es invisible. Se estiman tres masas solares para el compañero que no se ve pero que influye en el movimiento del otro. Este objeto oscuro es un candidato a agujero negro.

Los candidatos conocidos para ser agujeros negros tienen masas menores a las veinte masas solares, de manera que los objetos observados por su emisión de ondas gravitacionales y con masas de veintinueve o treinta y seis masas solares son excepcionales. No se sabía de la existencia de tales objetos.

Desde hace tiempo se sospecha de la existencia de agujeros negros supermasivos. Estos pueden tener masas millones de veces mayores

¹¹ El efecto Doppler, así llamado en memoria del físico austriaco Christian Andreas Doppler, es el cambio aparente en la frecuencia de una onda cuando la fuente se mueve —por ejemplo: el sonido de una sirena cuando pasa una ambulancia cambia de un tono más agudo a uno más grave por este efecto—.

¹² Fernando de Magallanes fue el primer europeo en avistar, en el hemisferio Sur, lo que pensó que eran nubes, dándoles así el nombre que ahora tienen.

a la del Sol. La mayoría se podría encontrar en el centro de las Galaxias y pertenecen a una categoría distinta porque no se forman con la fusión de dos agujeros negros más pequeños. Es probable que su crecimiento se deba al colapso de agujeros negros de origen estelar, así como a la acumulación de gas, estrellas y material galáctico a lo largo de miles de millones de años.

En el centro de nuestra Galaxia Vía Láctea se encuentra Sagitarius A*, un candidato a agujero negro supermasivo (Henderson, 2008) descubierto en 1974.

Capítulo 14

El agujero negro en el centro de nuestra galaxia

Un telescopio global intenta «ver» al agujero negro en el centro de nuestra Galaxia. Mostró ya la imagen del que se encuentra en el centro de la Galaxia M87 y ha comenzado a escudriñar el cielo en busca de objetos interesantes con el observatorio más grande construido hasta ahora.

Vía Láctea significa «Camino de leche», es el nombre que recibe la Galaxia en donde vivimos. El nombre latín tiene su origen en Grecia donde llamaron así a la franja luminosa que atraviesa el firmamento. En su mitología era leche derramada del pecho de la Diosa Hera. La visión de esta mancha blanca en el cielo nocturno ha inspirado desde tiempos remotos a todas las culturas que han poblado la Tierra.

Demócrito pronosticó que se trataba de un conglomerado de estrellas cuando aún no se podía observar con detalle y todos lo veían como si fuera un líquido regado en el cielo.

Demócrito de Abdera es recordado entre los físicos por la extensión de su mirada. Cuando aún no era posible observar el detalle microscópico de la materia Demócrito anunció que existían átomos y cuando miró al cielo para ver la Vía Láctea pensó que estaba hecha de estrellas. Le dio así estructura al asperjado líquido donde todos veían un rocío lácteo sin granularidad en la oscuridad de la noche.

Ahora, cuando han transcurrido casi dos mil quinientos años de la mirada inquisitiva de los griegos que le dieron nombre, los telescopios del mundo se alinean para observar lo que existe, ya no en el brazo de la espiral que parece un camino de leche, sino lo que se encuentra en el centro de la estructura completa.

Con una técnica moderna que utiliza las señales de diferentes telescopios es posible reconstruir la forma de objetos muy alejados. El EHT (por sus siglas en inglés: *Event Horizon Telescope*) es la unión de ocho telescopios de todo el mundo. La capacidad de este instrumento global alcanza una resolución de quince microsegundos de arco¹³.

La combinación de la luz que recolectan de manera aislada cada uno de los ocho telescopios participantes, permite formar imágenes con la calidad equivalente a lo que obtendría un observatorio del tamaño de nuestro planeta.

Para que usted tenga idea de lo que significa la gran resolución de este arreglo de telescopios le diremos que con ella se podría ver en detalle una pelota de golf en la superficie de la Luna.

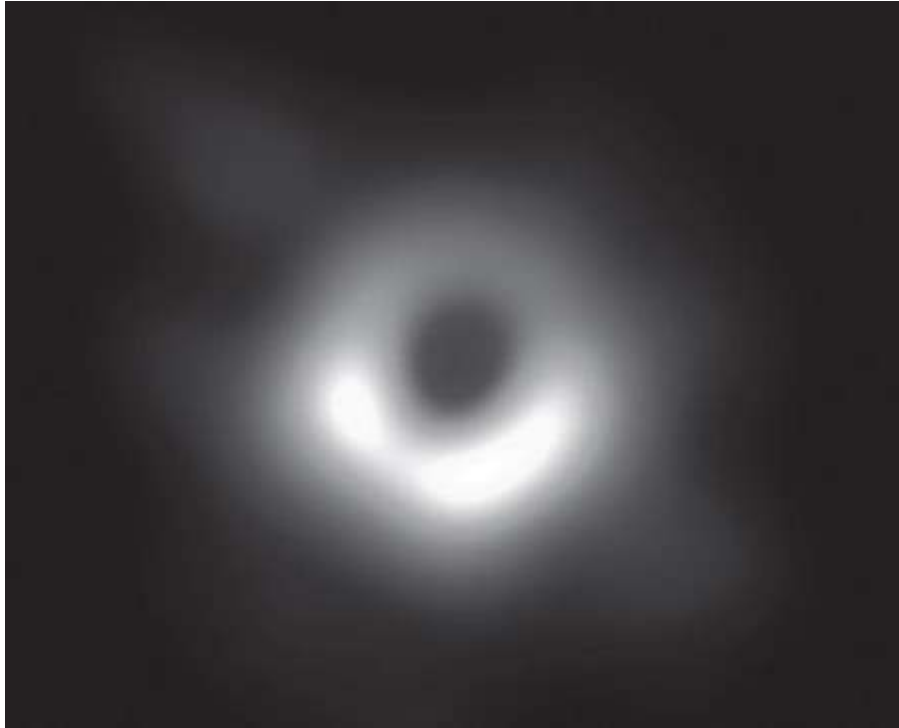
El EHT enfoca su mirada en la estructura que circunda al agujero negro en el centro de la Galaxia. Este debe ser pesado. Se lo ha llamado Sagitarius A* y todo parece indicar que su masa es cuatro millones de veces mayor que la masa de nuestro Sol. Sin embargo,

¹³ En astronomía se mide la resolución en términos del ángulo que subtiende un arco. Si usted estira su brazo y mira al cielo nocturno, notará que con el brazo estirado el dedo meñique puede cubrir a la Luna. Tomando al ojo como vértice, el arco que barre el dedo es de aproximadamente un grado.

el horizonte de sucesos que marca la frontera del agujero negro tiene un diámetro de apenas unos diez o veinte millones de kilómetros. Ese es el tamaño del agujero negro en la mira: diminuto en la escala universal y desafiante para lo que está al alcance de nuestros modestos instrumentos.

El grupo colaborativo EHT programó orientar sus antenas al mismo punto del cielo durante el mes de abril de 2017. Durante cinco noches entre el 5 y el 14 de abril todos los telescopios asociados dedicaron su tiempo a la mirada confluyente en la búsqueda del centro de la Galaxia. Después de la observación los datos obtenidos se están procesando. Nubes de gas y polvo dificultan la reconstrucción de la imagen de Sagitario A* pero el consorcio de telescopios mostró la imagen del centro de la Galaxia elíptica M87 mejor conocida como Galaxia Virgo que se encuentra en el cúmulo que lleva el mismo nombre. Este agujero negro se encuentra a más de cincuenta millones de años luz de nuestro planeta.

La imagen publicada en abril de 2019 representa la primera evidencia directa de la existencia de los agujeros negros.



Agujero negro supermasivo en el centro de la Galaxia M87 (EHT, 2019).

¿A dónde mirar si uno quiere ver el centro de nuestra Galaxia?

El centro se encuentra entre las constelaciones de Ofiuco, Sagitario y Escorpión. En ese punto del cielo donde el ojo desnudo solo encuentra oscuridad, está el enorme agujero negro. A este tipo de portentos de indomable Fuerza gravitacional se les llama agujero supermasivo.

La distancia de nuestro planeta a este objeto es de aproximadamente 26 mil años luz, lo que significa que un haz luminoso tardaría 26 mil años en llegar hasta nosotros. La Galaxia espiral en que vivimos tiene un diámetro de aproximadamente 90 mil años luz y el ancho del disco es de unos 20 mil años luz.

Nuestro sistema solar está pues muy alejado del centro denso de la Vía Láctea, y por eso, el tamaño aparente de ese enigmático objeto es muy pequeño.

El telescopio global usa la señal que tiene 8 milímetros de longitud de onda para mirar al centro de la Galaxia. Los telescopios incluidos en la colaboración internacional son: el Telescopio del Polo Sur en la Antártida, el Gran Arreglo Milimétrico de Atacama en Chile, el Gran Telescopio Milimétrico de México, el Telescopio Submilimétrico de Arizona, el Telescopio James Clerk Maxwell Arreglo Submilimétrico en Hawai y el IRAM de 30 metros en España.

Esta composición de instrumentos es un telescopio del tamaño del mundo, sin acudir en este caso a la metáfora usual para describir lo gigantesco.

Para poder juntar las señales de todos ellos es necesario sincronizar los relojes con un alto nivel de precisión, pero el verdadero reto consiste en controlar el ruido de la electrónica, que puede ser mayor que el tamaño de lo que se quiere medir.

Mezclar las señales de todos estos aparatos no es sencillo, pero cuando esto se consiga se espera ver ahí un disco negro entornado por un anillo brillante de fotones. El anillo de luz será más intenso de un lado que del otro por que la rotación del agujero le da mayor luminosidad en una dirección. Esto se puede apreciar también en la película *Interestelar* donde el agujero negro llamado Gargantúa presenta la misma simetría. La imagen fue obtenida con la solución formal de las ecuaciones que describen el espacio-tiempo. Kip

Thorne, actual Premio Nobel de Física por el descubrimiento de las ondas gravitacionales fue parte del equipo asesor de la película.

El área del disco negro delineado por el contorno luminoso es proporcional a la masa del objeto. Medirlo arrojará una mejor estimación de sus propiedades.

Si bien es cierto que un agujero negro tiene una Fuerza gravitacional muy intensa no es eso lo que determina su naturaleza. Existen otros objetos en el espacio que han reunido una masa considerable y que por esa razón presentan una Fuerza de atracción gravitacional muy grande, sin embargo, eso no los hace agujeros negros, son solo cuerpos inmensos que perturban su vecindad con la pesadez de su presencia. La característica que define de manera precisa lo que es un agujero negro es la aparición de un «horizonte de eventos» en su alrededor. Este horizonte es una línea —de manera más precisa una superficie—, que divide al espacio y el tiempo en dos regiones. Todo lo que ocurre en un punto localizado en una de ellas no afecta al observador del otro lado.

Cuando eso ocurre, cuando dos regiones del espacio y el tiempo se desconectan, decimos que estamos en el «horizonte de sucesos» generado por un agujero negro.

El nombre que se le da: «horizonte de sucesos», también conocido como «horizonte de eventos», tiene que ver con lo que ocurre cuando un objeto cae en el agujero negro. Para un objeto no hay efectos aparentes al cruzar el borde, sin embargo, estar más allá de la línea le impide para siempre la posibilidad de un retorno. A partir del momento en que este ha cruzado el umbral ya no tiene más

opciones que la de seguir cayendo. Las alternativas dejan de existir y solo queda el colapso hacia el centro del objeto que lo ha engullido.

En ninguno de los candidatos existentes para ser agujeros negros se había podido observar nunca al «horizonte de eventos». El centro de la Galaxia M87 es el primero. Por lo demás, la manera como se mueven los objetos en derredor de algún punto oscuro y la incapacidad de ver algo que provoque esos movimientos nos hacen pensar que ahí se encuentra una de estas piezas singulares, expresiones extremas de la naturaleza.

Al agujero negro en el centro de la Galaxia se lo ha estudiado de muchas formas. En tiempos recientes el Telescopio Espacial Hubble observó por varios años el movimiento de las estrellas en la región donde se localiza. Con esto y otras mediciones se pudo determinar la presencia de una masa 4 millones de veces mayor que la del Sol.

Los agujeros negros estimulan la imaginación de la gente, ¿quizá porque corporizan la muerte? O tal vez son la evocación del misterio más profundo que representa el cruzar una línea que nos separa para siempre. Hay algo de eternidad en lo inexorable de una transición que nos disocia... eso es un agujero negro: un adiós sin posibilidad de retorno, el destino tan desconocido a nosotros como ineludible para todo aquello que traspasó la línea crucial.

Sin embargo, un agujero negro no es tan malo como lo evocan las figuraciones de la gente. La Fuerza de Gravedad que ejerce sobre otros objetos puede ser irresistible si uno se encuentra cerca, pero, a la distancia, no es más poderoso que ningún otro objeto. Si, por

ejemplo, el Sol llegara a convertirse en un agujero negro, nuestro planeta se volvería oscuro y frío, pero continuaría orbitando de la misma forma como lo ha estado haciendo durante los últimos 5 mil millones de años. Para que el Sol se transformase en un agujero negro sería necesario comprimir el radio de 700 mil kilómetros que tiene a solo 3 kilómetros.

Hoy pensamos que existen por lo menos tres tipos de agujeros negros: los «agujeros negros estelares» que se han formado a partir de estrellas que agotaron su combustible y acaban colapsando bajo su propio peso; los «miniagujeros negros» del tamaño de asteroides y de los cuales solo se piensa que debieron haber surgido en etapas tempranas del Universo; y los «agujeros negros supermasivos» que están en el centro de las Galaxias. No se sabe cómo pudieron haberse formado estos gigantes, pero podrían ser resultado de la fusión de agujeros negros más pequeños.

Los agujeros negros consisten pues de una singularidad¹⁴ en el centro mismo del objeto. Esta singularidad es la punta de un alfiler sin dimensiones donde toda la materia capturada por la descomunal Fuerza Gravitacional se funde en el misterio. Además de esto, el agujero negro se caracteriza por el horizonte de eventos que marca los linderos de la escisión. La tercera componente de este

¹⁴ Una singularidad en este contexto es la región del espacio y del tiempo en la que no se pueden definir magnitudes físicas. En matemáticas una singularidad es el punto donde una función tiende a infinito.

arreglo letal es la capa de escombros que giran a su alrededor en espera de su inevitable evanescencia.

El cielo nocturno no ha dejado de asombrarnos desde aquel momento en que, provistos de conciencia, nuestros ancestros miraron por vez primera las estrellas. Es muy significativo que sea el cielo lo que motiva nuevas formas de cooperación entre los humanos. La unión de telescopios es un fenómeno social notable. Visto con detenimiento, este trabajo conjunto es más profundo que todo lo que podría pronosticar el orden social alcanzado.

Los que trabajamos en proyectos internacionales movidos por la asociación, el compromiso, la complicidad entre naciones, no solo queremos entender el principio y el fin de las cosas, también vemos en la cooperación un parte esencial del ser humano.

Observemos pues el centro de la Galaxia para que nos resulte de nuevo claro que somos una insignificante, frágil y efímera mota de polvo en la vastedad del Universo.

Capítulo 15

Viaje al centro de la galaxia

«En las tinieblas la imaginación trabaja más activamente que en plena luz», decía el filósofo Immanuel Kant. Para hacer un viaje de doscientos sesenta billones de kilómetros el cuerpo estorba, pero nuestro organismo es solo información que puede ser comprimida en un haz de luz para viajar en la oscuridad intergaláctica.

Imaginemos que viajamos al centro de la Galaxia. Nos tomará veintiséis mil años y terminará de manera dramática. El centro de la Galaxia no es un lugar hospitalario. Esa barra alargada y densa en cuyo interior se encuentra una potente fuente de ondas de radio. Al núcleo de esta región lo llamamos Sagitarius A* y ocupa el espacio que circunscribe Mercurio alrededor del Sol. Si lo tuviéramos en el lugar de nuestra afable estrella veríamos su resplandor mortal a la distancia que vemos hoy al planeta más interior de nuestro acogedor sistema planetario.

Para llegar al centro de la Galaxia se necesita una longevidad improbable y un transporte insólito, pero podemos simplificar en archivos informáticos todo lo que somos. El formato de ceros y unos del sistema binario es la opción para un viaje tan largo. Después de todo y a pesar de la complejidad que nos conforma somos una corta lista de instrucciones. La naturaleza humana se podrá reconstruir una vez que tenga cinco gigabytes —o menos— de códigos genéticos, registros epigenéticos, historia y desarrollo psicosocial. Supongamos

que hemos podido reunir las claves en un haz de luz que viaja al interior de la Galaxia. La reconstrucción posterior de un ser humano reclamaría de los elementos, las condiciones y un proceso que no conocemos, pero viajar como luz es la manera de llegar al centro de la Galaxia en tan solo veintiséis mil años.

Habría que dejar la banda transversal Orión que nos aloja, esa saliente que se extiende entre los brazos espirales de Perseo y Carina Sagitario. Habría que pasar por un costado de la nebulosa Águila, a pocos años luz de los portentosos Pilares de la Creación que inspiraron a las generaciones pasadas, atravesar las ramificaciones de Scutum Crux y Norma para llegar hasta el centro ovalado, poblado de estrellas, nubes de gas y exóticos astros que se forman y se destruyen.

En el camino habría que evitar la distorsión que los cuerpos masivos podrían provocar al remoto haz binario que nos transporta. Las estrellas de neutrones son objetos muy pesados que palpitan en el cielo como gigantescos corazones que baten sin parar emitiendo pulsos de radiación mientras giran.

Es en este cielo que atraviesa la mirada, donde está escrito nuestro destino. Aquí podemos leer el pasado y el futuro con un simple artificio de la estadística. Basta con mirar atentamente el desarrollo de los astros para saber qué pasará con el Sol y los planetas. En este caminar al centro de la espiral láctea lo más abundante son las enanas blancas, esos remanentes que se producen cuando las estrellas pequeñas mueren. El que nos alumbra terminará en un

objeto compacto del tamaño de nuestro planeta. Será una enana blanca en el aluvión que deposita el tiempo.

Cuando por fin llegemos no será fácil acercarse al centro. Será necesario alinear bien y ajustar las coordenadas para dar con tan pequeño objetivo en la bastedad del espacio. Si uno se acerca lo suficiente entrará en su campo gravitacional y entonces comenzará a caer, primero lentamente para que después la velocidad aumente en forma creciente. Pronto estará girando envuelto en la luz que rodea a un inmenso disco negro. Cuando cruce el horizonte de eventos no se percatará de que ha traspasado el umbral más dramático y tajante del Universo. Desde ese momento ya no hay vuelta atrás. Usted desaparecerá de nuestra vista porque la luz que antes se reflejaba en su estructura dibujando en nuestros ojos la configuración de su cuerpo ya no podrá rebasar esa línea imaginaria que devora el brillo de las cosas. Para usted la posibilidad de un retorno ha desaparecido. Regresar no es más una opción en su futuro. Se encuentra ya dentro del agujero negro.

El horizonte de sucesos que acaba de rebasar es lo que define el adentro y el afuera en el último de los escenarios cósmicos. Esto es la separación entre lo que somos y lo que no sabemos qué es. A partir de este momento su viaje se prolongará diez segundos mientras usted sigue cayendo. Durante ese tiempo recorrerá una distancia de tres millones de kilómetros y tendrá la oportunidad de ver cómo es un agujero negro por dentro. Un paisaje desconocido estimulando los sentidos de su cuerpo en extinción. Un último destello de la conciencia aislada en el vapor de un pensamiento y en

un instante que desaparece. Ha llegado al centro mismo del misterio donde todo acaba en una singularidad matemática sin extensión ni dimensiones.

Por fin tendrá ante sus ojos la cualidad central del punto indiviso, la esencia de su naturaleza, la propiedad única de ser el albergue de todas las cosas, de todo lo que ha sido y todo lo que será. Su viaje ha terminado.

Capítulo 16

El gran atractor

¿Hasta dónde ha llegado la mirada humana? ¿Cuál es el punto más lejano donde se ha posado el ojo?

Nuestra Galaxia es parte de un conglomerado de galaxias al que se conoce como Laniakea, palabra hawaiana que significa «Cielo Inconmensurable».

Antes se pensaba que la Vía Láctea se encontraba en el Supercúmulo de Virgo, que es uno de los muchos racimos galácticos en el Universo observable. Ahora sabemos que este es solo una parte de una estructura mayor, Laniakea, que mide quinientos veinte millones de años luz.

Aunque se debate la posible existencia de estructuras mayores, por ahora este gigantesco supercúmulo de galaxias y los filamentos de materia que unen sus partes es conocido como el «Final de la Grandeza». Con esta locución se describe al límite de nuestro conocimiento. Hasta aquí llega la mirada que descifra la organización última del Universo.

Así podrían resumirse las conclusiones del sofisticado análisis más reciente sobre la estructura del Universo en gran escala. Para esto se usaron las velocidades de más de ocho mil galaxias conocidas. El movimiento ocasionado por las Fuerzas gravitacionales muestra un patrón dinámico singular: la mayor parte de las galaxias se mueven arrastradas hacia un centro denso, ahora conocido como el «Gran Atractor».

El Gran Atractor debe ser el resultado de una aglomeración descomunal de materia. No sabemos exactamente cuán grande es, pero sí se puede inferir que arrastra a las galaxias en un radio de más de trescientos millones de años luz de distancia. En fechas más recientes se ha sugerido, con base en observaciones, que podría tratarse de un supercúmulo de Galaxias.

Nuestra Galaxia se encuentra en el extremo de uno de los apéndices más largos y alejados de Laniakea y entre el Gran Atractor y nosotros hay una inmensa región de vacío.

Un aspecto curioso de la configuración descomunal del Cosmos son los hilos que conectan galaxias entre sí formando una gran maraña. En esta telaraña existen zonas de vacío y oscuridad, así como inmensos espacios llenos de luz y de materia.

El Universo entero se puede ver como una red cósmica de galaxias.

Los hilos de materia son poco visibles. La materia que los forma irradia poco y una buena parte está formada de algún componente misterioso del que no sabemos mucho. Esta estructura filamentosa ha sido corroborada de diversas maneras.

La red puede ser imitada por programas computacionales que simulan el desarrollo del Universo desde sus primeros momentos después del Big Bang. En los últimos años se ha podido establecer de manera observacional la existencia prevista de nodos de materia densa y delgados filamentos que los unen.

De esta manera se nos va revelando el Universo como un tejido de hilos intergalácticos que nos recuerda al entramado de dendritas neuronales en nuestro cerebro. El asombroso parecido ha hecho

que más de uno piense que el Universo es un cerebro enorme que toma conciencia de sí mismo. La idea de un Universo consciente despierta la imaginación de los que buscan una correspondencia mística en las cosas de la naturaleza. El ente común es seguramente la existencia de principios fundamentales que generan formas y apariencias, la universalidad de las Fuerzas y la inexorable realización de las leyes fundamentales que se repiten a todas las escalas.

Por otro lado, la idea de un Universo consciente se realiza cuando nos damos cuenta de que la naturaleza llegó a construir nuestro cerebro para contemplarse a sí misma. Carl Sagan decía: «El cosmos también está dentro de nosotros, estamos hechos de la misma sustancia que las estrellas. Somos una forma en la que el cosmos se conoce a sí mismo».

Capítulo 17

Las otras fuerzas

*«Lo que mantiene unido al mundo
en su interior».*

J. W. VON GOETHE

Hasta ahora nos hemos referido a fenómenos del cielo. Ahí el efecto de la Gravedad puede ser medido observando el movimiento de planetas y galaxias. Nos hemos restringido al mundo gigantesco de las estrellas y agujeros negros en busca de confirmación a la descripción que la Teoría de la Relatividad General nos da de la Fuerza gravitacional como curvatura del espacio-tiempo. Existe sin embargo un mundo microscópico y en él la observación de los fenómenos nos revela una naturaleza distinta. Durante el siglo pasado se avanzó mucho en la observación de la materia con instrumentos cada vez más capaces de adentrarse en su interior. En este extremo del Universo donde lo más pequeño se comporta de manera extraña hemos descubierto la existencia de tres Fuerzas.

¿Cómo observar el mundo microscópico de las tres Fuerzas?

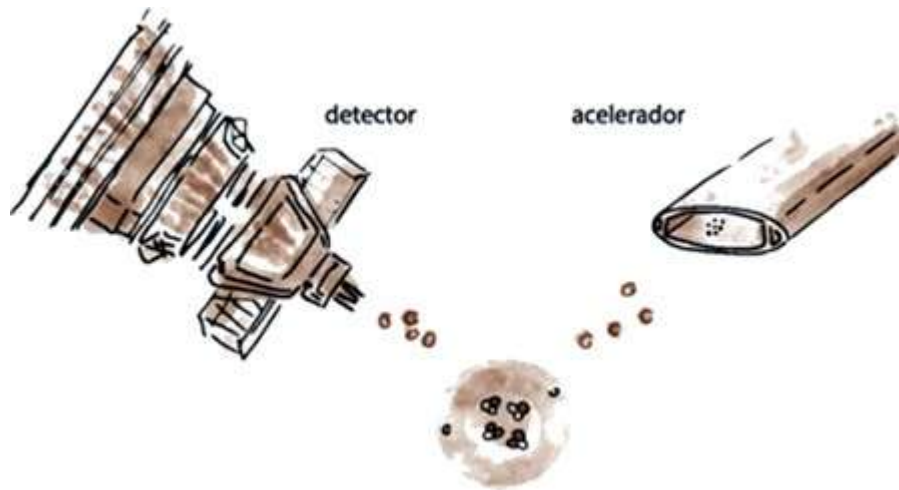
Para ver con nuestros ojos necesitamos luz. Uno puede pensar en la luz como formada por miles de millones de fotones que chocan con el objeto que estamos viendo y luego llegan reflejados hasta nuestros ojos. Por su dirección podemos saber dónde se encuentra el objeto. Según se distribuyen estos fotones en la retina sabremos si el objeto es redondo o cúbico, etc. Más aún, por la frecuencia con que llegan los fotones a nuestra retina podemos saber si el objeto es

verde o rojo y podemos discernir una textura en su superficie. Nuestro cerebro analiza la información que los ojos le proporcionan y crea la imagen del objeto en nuestra mente.



Ver significa interponer un detector ante el mundo externo que dispersa luz. El cerebro procesa la información para interpretar la geometría, el color y la textura de los objetos que vemos. Nuestro detector es el ojo.

La manera como vemos el mundo microscópico es igual, pero en lugar de fotones usamos otras partículas con mayor penetración que nos permitan ver lo que con luz y nuestros ojos no podemos.



Ver el mundo microscópico significa interponer un detector construido con la más alta tecnología para ver la radiación dispersada que se hace incidir en el objeto de estudio. El procesamiento de la información en computadoras nos proporciona una imagen.

El instrumento más poderoso que tenemos en la actualidad para ver el mundo de lo diminuto es el acelerador Gran Colisionador de Hadrones que se encuentra en el Centro Europeo de Investigaciones Nucleares (CERN: por sus siglas en francés *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*) en Ginebra, Suiza. Esta máquina es capaz de incursionar en dimensiones tan pequeñas como unos diez mil milésimos del tamaño del protón. Ahí, en esa escala, se encuentran tres interacciones actuando entre las partículas.

Pensamos que debe haber una relación escondida entre la Fuerza de Gravedad y las otras Fuerzas de la naturaleza. Desde hace mucho tiempo los físicos buscan esa relación y bien podemos decir que la posibilidad de unificación hoy es uno de los temas centrales de las investigaciones en física.

En su libro sobre la gravedad (Gamow, 1962), George Gamow cita la bitácora de Michael Faraday, químico y físico británico que estudió los fenómenos eléctricos y magnéticos sentando las bases de lo que sería el campo electromagnético.

En 1849, Faraday escribía: «Gravedad: seguramente esta Fuerza debe ser capaz de relacionarse experimentalmente con la electricidad, el magnetismo y otras Fuerzas como para constituir efectos equivalentes y recíprocos».

La naturaleza de estas Fuerzas se encuadra en nuestra visión del mundo microscópico y en la manera como hemos logrado entender la estructura elemental de la materia. Siempre nos hemos preguntado: ¿De qué están hechas las cosas? ¿Qué es la materia? Y también desde hace mucho tiempo¹⁵, pensamos que el mundo está hecho de partículas elementales. Cuando decimos elementales, queremos decir que son simples, indivisibles y por tanto que no están formadas por otras.

Los antiguos pensaban que el fuego, el agua, el aire y la tierra eran los cuatro elementos de la naturaleza y que al combinarlos daban la gran variedad de sustancias que nos rodean. Después se descubrieron entidades microscópicas a las que se llamó átomos.

Hasta hace poco se creía que el átomo —palabra introducida por los griegos y que significa indivisible— era el ladrillo fundamental con el que se construía todo lo demás. Los científicos ordenaron los

¹⁵ En 460-370 a. e. c. Demócrito de Abdera propuso que la materia estaba hecha de elementos indivisibles a los que llamo átomos.

diferentes tipos de átomos y los colocaron en una tabla que aún se llama tabla periódica de los elementos. Sin embargo, cuando se logró «ver» con más detalle a los átomos, los físicos se dieron cuenta de que en realidad estos tenían una estructura: los átomos no son elementales.

Los experimentos mostraron que el átomo está hecho de un núcleo pesado con carga eléctrica positiva, rodeado por una nube de electrones.

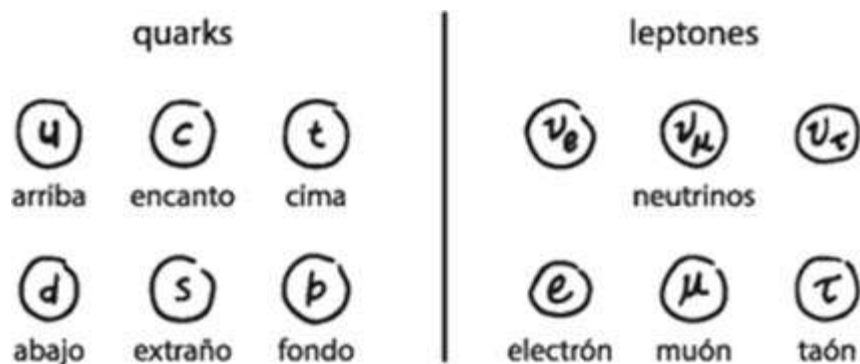
En ese momento se pensó que el núcleo de los átomos era elemental: pequeño, sólido e indivisible. Sin embargo, cuando fue posible ver dentro del núcleo de los átomos, se encontró que estaba hecho de protones y neutrones y por un tiempo se pensó que los protones y neutrones eran elementales. Más tarde se descubrió que están compuestos de partículas llamadas «quarks».

Desde que esto ocurrió en los años sesenta seguimos pensando que los quarks y los electrones son realmente elementales. Esto quiere decir que no están hechos de otras partículas, no tienen una estructura, no tienen un tamaño, y en suma, decimos que son puntuales.

Es posible que un día nos demos cuenta de que los quarks y los electrones no son realmente elementales, sino que estén hechos de otras partículas. Quizá, lo que las forme estará a su vez, constituido de otras más pequeñas. No lo sabemos. Por ahora pensamos que las partículas elementales son los quarks, de los que tenemos seis tipos diferentes, y el electrón junto con sus hermanos más pesados, el

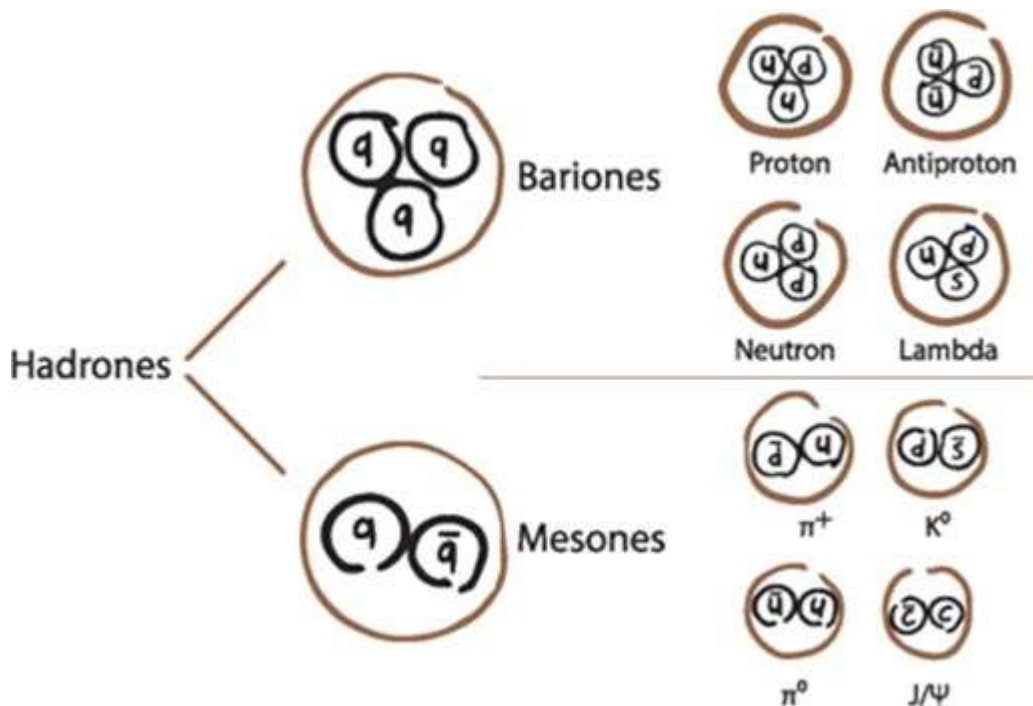
muon y el taón, así como los neutrinos asociados a cada uno de ellos. Todo a nuestro alrededor está formado por estas partículas.

Los quarks se agrupan formando hadrones y existen dos tipos de ellos: los que contienen dos y los que contienen tres quarks. A los grupos de dos se los llama mesones y a los grupos de tres se los llama bariones.



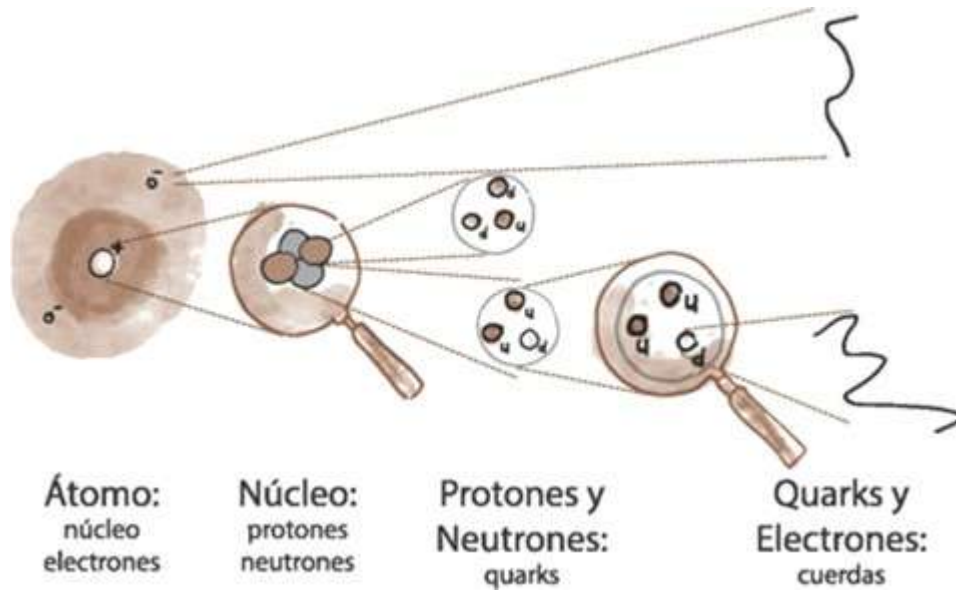
Partículas elementales que forman la materia.

Un ejemplo de barión es el protón que se encuentra en los núcleos de los átomos. El protón está formado por dos quarks «u» y un quark «d». Un ejemplo de mesón es el más ligero llamado «pion» que está formado por dos quarks.



Los quarks se agrupan en dos o tres para formar mesones o bariones (izquierda). Ambos son conocidos como hadrones. Algunos ejemplos de bariones y mesones (derecha).

Al electrón y sus hermanos, muon y taón, así como a sus neutrinos, se los llama «leptones». Existen seis tipos de estos, el más familiar de los cuales es el electrón. Es el que forma parte de los átomos y circula por los alambres de cobre para encender las lámparas y los aparatos que tenemos en casa.



Los átomos están formados por núcleos y electrones. Los electrones son partículas elementales y los núcleos están formados por protones y neutrones, que a su vez están formados por quarks. Podría ser que los quarks y los leptones estén formados por diminutas cuerdas, pero esto es solo una hipótesis.

Hay tres tipos de neutrinos entre los seis leptones que existen. Son muy ligeros y casi no interaccionan con nada. Uno está asociado al electrón, otro al muon y otro al taón.

Algunos piensan que los quarks y los leptones, que ahora creemos que son elementales, están hechos de cuerdas. Según esta teoría, las cuerdas son los objetos más pequeños posibles y son tan diminutas que por ahora no podemos ni soñar en detectar alguna de ellas. Para los que piensan en cuerdas como las verdaderas partículas elementales, los quarks y los electrones son solo diferentes manifestaciones de las cuerdas al vibrar.

Las cuerdas son objetos que habitan en muchas dimensiones. No se limitan a las tres espaciales y una temporal en que vivimos nosotros. Existen cuerdas abiertas y cuerdas cerradas y todas interaccionan entre sí uniéndose o separándose, abriéndose o cerrándose, y de esa manera generan las Fuerzas fundamentales que vemos en la naturaleza. La teoría que describe su comportamiento es unificadora porque explica en un solo marco de conceptos todos los aspectos del micro y el macro-cosmos.

Las fuerzas: una manera distinta de entenderlas

Si el mundo está formado de quarks y de leptones, ¿qué es lo que los une?, ¿cómo es que se juntan dos o tres quarks para formar hadrones? y ¿qué hace que los electrones giren alrededor de los núcleos de los átomos?

Como hemos visto, existen cuatro Fuerzas responsables de unir o separar a los objetos de la naturaleza. En el mundo de las partículas elementales solo se manifiestan tres de estas cuatro y son las que actúan para formar estructuras más complejas.

Las fuerzas fundamentales del mundo microscópico son:

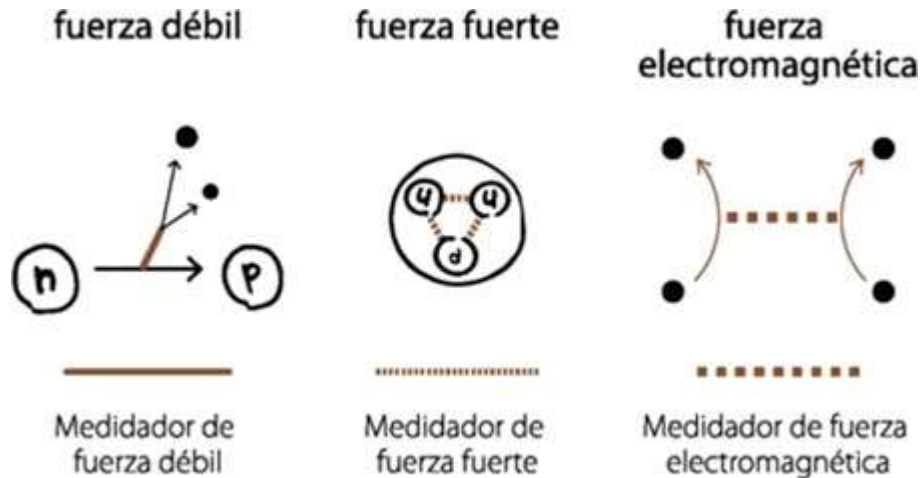
- **La Fuerza Electromagnética**, que hace que las partículas con carga eléctrica negativa —como el electrón— atraigan a las que tiene carga positiva —como el protón—. Se pensaba que el magnetismo era una Fuerza distinta pero hoy sabemos que la atracción de los imanes sobre los metales es del mismo tipo

que la Fuerza eléctrica y por eso hablamos de la Fuerza Electromagnética.

- **La Fuerza Fuerte**, que hace que los quarks se junten en dos o tres para formar a los hadrones¹⁶.
- **La Fuerza Débil**, responsable de la radiactividad de algunos elementos.

Las tres Fuerzas entre las partículas de materia se dan por el intercambio de otras partículas a las que llamamos mediadoras. Para la interacción electromagnética la mediadora es el fotón. El intercambio de fotones entre las partículas cargadas eléctricamente hace que se atraigan o se repelan. La Fuerza Fuerte intercambia gluones para atraer a los quarks que forman hadrones y la Fuerza Débil intercambia partículas Z^0 , W^+ y W^- que tienen además la peculiaridad de transformar a las partículas que las emiten y/o absorben.

¹⁶ Hoy tenemos razones para pensar que existen aglomerados de más quarks formando estructuras hadrónicas a las que se ha llamado tetraquarks (cuatro quarks), pentaquarks (cinco quarks), hexaquarks (seis quarks), etc.



La Fuerza Débil es el resultado del intercambio de los bosones Z y W, la Fuerza Electromagnética del intercambio de fotones y la Fuerza Fuerte del intercambio de gluones.

No todas las partículas interactúan con las demás a través de todas las Fuerzas. En la figura se muestra cuales partículas son sensibles a que interacciones.

Aunque nunca lo hemos visto, algunos piensan que existe un gravitón que es intermediario de la Fuerza de Gravedad. En realidad, la interacción gravitacional es descrita muy bien por la Teoría de la Relatividad General. En ese marco relativista no es posible describir las interacciones electromagnética, débil y fuerte. De manera equivalente, no es posible describir a la interacción gravitacional desde el formalismo de la mecánica cuántica.

El Higgs: una forma distinta de entender la masa

Además de las partículas de materia y las partículas de Fuerza existe una partícula llamada Higgs. Esta no es mediadora de

ninguna Fuerza. El Higgs es el responsable de que las demás presenten una resistencia a moverse, es decir, que tengan masa. El Higgs fue descubierto en 2012 en el Gran Colisionador de Hadrones del Centro Europeo de Investigaciones Nucleares (CERN). Era la pieza faltante en el cuadro de las partículas elementales, que ahora está completo.

	materia			fuerzas	masa
quarks	u	c	t	γ	H
	d	s	b	g	
leptones	ν_e	ν_μ	ν_τ	Z^0	W^\pm
	e	μ	τ		

La tabla completa de las partículas elementales incluye a las mediadoras de las tres interacciones y al Higgs que les da masa a las partículas con que interacciona.



El campo de Higgs puede ser visto como una sala llena de periodistas. Cuando una persona famosa entra todos la quieren saludar y eso lo hace moverse más lentamente a través del lugar (Boixader, 1996).



El Higgs se produce como una excitación provocada por un rumor que ocasiona la agrupación de los curiosos. Este se propaga como un grumo por la sala (Boixader, 1996).

¿Cómo es que el Higgs da masa a las demás? Para contestar esta pregunta haremos uso de la explicación que ganó una botella de *champagne* en Inglaterra.

En 1993 el ministro de Ciencia y Tecnología del Reino Unido, William Waldegrave pidió a los físicos británicos una explicación breve de lo que es el Higgs. Ofreció a quien describiera de la manera más sencilla la naturaleza del bosón una botella de *Champagne*, diciendo: «Aún no he decidido si financiaremos los experimentos propuestos para buscar el bosón de Higgs, pero prometo financiar una botella de *champagne* a quien logre explicarme qué es».

Un físico de la University College London, llamado David J. Miller, entregó un documento con el título: «Una explicación casi política del bosón de Higgs para *Mr. Waldegrave*, ministro de Ciencia del Reino Unido, 1993». Él fue el ganador y esta es la explicación (Miller, 1993):

Imagine una fiesta cóctel de un partido político en la que los trabajadores están distribuidos en el salón de manera uniforme y platicando con sus vecinos más próximos. El ex primer ministro entra al salón y lo cruza. Todos los trabajadores cerca del ministro se agrupan a su derredor. Conforme el ministro avanza atrae a la gente más cercana del lugar por donde pasa mientras que aquellos que quedan atrás regresan a sus posiciones originales. Debido a la gente que se agrupa alrededor del ministro él adquiere una masa mayor de la normal, es decir adquiere una resistencia al movimiento. En tres dimensiones y con las complicaciones de la Teoría de la Relatividad esto es el mecanismo de Higgs.

Para dar masa a las partículas se inventó un campo de fondo que se deforma localmente cuando una partícula pasa a través de él. La

distorsión, es decir, la agrupación del campo alrededor de la partícula genera su masa.

Necesitamos este campo porque de otra manera no podremos explicar porque las partículas W y Z que median la interacción débil son tan pesadas mientras que el fotón que media la interacción electromagnética no tiene masa alguna.

Así explicaba David Miller el mecanismo por el cual las partículas adquieren masa.

En la segunda parte se enfocó en la explicación de lo que es el Higgs:

Ahora considere que un rumor cruza la sala de trabajadores. Los más cercanos a la puerta lo escuchan primero y se agrupan para conocer los detalles. Luego se mueven a sus vecinos más próximos quienes quieren saber de qué se trata el rumor. Una onda de agrupamiento corre por la sala para alcanzar todos los rincones o puede formar solo un paquete compacto que lleva las novedades a lo largo de la línea de trabajadores hasta el otro extremo donde probablemente esté un dignatario. Ya que la información es llevada por el agrupamiento de trabajadores y dado que el agrupamiento es lo que dio masa a las partículas, el agrupamiento que lleva al rumor mismo tiene masa. El bosón de Higgs es justamente este agrupamiento en el campo de Higgs. Si podemos ver al Higgs sería más creíble que el campo exista y que el mecanismo que le da masa a las partículas que hemos descrito arriba es correcto.

El Higgs es pues un campo que lo permea todo. Cuando este campo interacciona con las partículas les comunica una inercia que se manifiesta como masa.

Es la manera como entendemos la masa del mundo microscópico desde la mecánica cuántica. Aquí no se trata de una distorsión del espacio-tiempo como en la Teoría de la Relatividad General se trata de un campo que conserva simetrías a las que regresaremos más adelante. En el siguiente capítulo reflexionaremos sobre este punto particular.

Capítulo 18

El origen de las fuerzas y la búsqueda de unidad

«La unidad es la variedad, y la variedad es la unidad, esta es la ley suprema del Universo».

ISAAC NEWTON

Los físicos siempre han pensado que las Fuerzas fundamentales de la naturaleza están relacionadas. Consideran que las cuatro interacciones se nos presentan como distintas cuando en realidad son aspectos de una sola Fuerza. El esquema de ideas es que cuando el régimen de energía es muy alto y la escala microscópica muy pequeña, las Fuerzas se unifican. No tenemos una teoría que describa esta unificación, pero su búsqueda es sin duda el objetivo más importante de la física de nuestros días (Gordon, 2017).

Una razón moderna para pensar en la unificación de las Fuerzas viene dada por el modelo que hoy aceptamos como explicación del origen del Universo. Tenemos evidencia observacional que nos dice que todo comenzó en una gran explosión hace trece mil ochocientos millones de años. Esto significa que en sus comienzos todo lo que vemos era esencialmente uno y lo mismo y que es a partir de ahí que se generó la diversidad que existe en nuestro alrededor. Las Fuerzas no tendrían por qué ser la excepción, debieron surgir de una sola al comienzo de los tiempos.

Hoy se piensa que en el Tiempo de Planck es decir cuando el Universo tenía 10^{-43} segundos de edad, solo existía una interacción.

A las teorías que se proponen para entender esta fase se las conoce como de Gran Unificación. Pero justo después de esta etapa la Fuerza gravitacional se separó para dejarnos un Universo con dos interacciones: la gravitacional y la interacción de Gran Unificación.

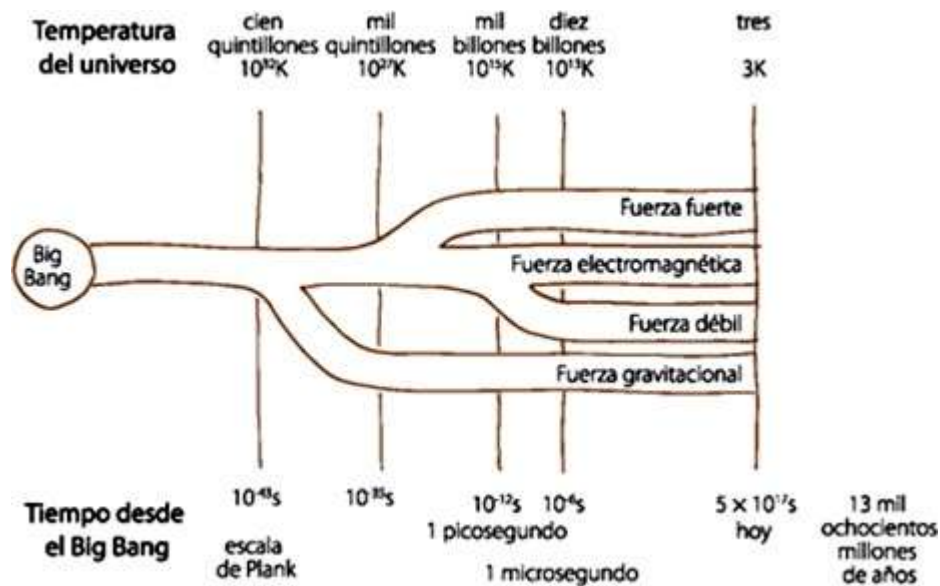
Muy poco después, cuando el Universo cumplió los primeros 10^{-35} segundos sufrió un proceso de violento crecimiento. De pronto y por solo un instante, imperceptible de tan corto, el Universo se expandió. En este exiguo momento, el Universo creció hasta hacerse un centenar de octillones de veces mayor de lo que era. A este desmesurado crecimiento se le conoce como inflación cósmica, resultado de una inestabilidad del Universo recién nacido. Las consecuencias fueron no solo el dramático crecimiento sino además la creación de una gigantesca cantidad de materia. De no haber ocurrido la inflación, el Universo hubiese colapsado sin dejar rastro ni testigos. En esta época el Universo creció del tamaño que tenía, miles de millones de veces más pequeño que un protón, al tamaño de una naranja; esto en un instante inconcebiblemente breve. Tan sobrecogedor cambio en el Universo lo estabilizó y lo hizo perdurable. Es en este periodo inflacionario cuando la Fuerza fuerte se separó de la interacción electrodébil.

En su nueva etapa el Universo era más frío, la temperatura había descendido a tan solo mil billones de grados. Las partículas y las antipartículas aparecían de manera espontánea, algunas abandonaban la virtualidad para convertirse en partículas reales.

Es también en ese tiempo, cuando apenas había transcurrido una milésima de picosegundo, que la materia terminó dominando sobre

la antimateria. Cuando el Universo cumplió su primer picosegundo de edad la Fuerza electromagnética y la interacción débil se separaron. Hasta ese momento era una sola Fuerza conocida como electrodébil.

Hoy, después de trece mil ochocientos millones de años, el Universo tiene apenas 3 Kelvin de temperatura. En este Universo tan frío en el que vivimos (aproximadamente $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$) existen estas cuatro Fuerzas fundamentales.



La historia de las Fuerzas fundamentales comienza en la escala de Planck cuando el Universo se origina. A medida que el Universo se enfriaba fueron apareciendo otras interacciones.

Todo el proceso que llevó a la separación de las Fuerzas fundamentales ocurrió muy temprano en la historia del Universo. No había transcurrido una fracción de segundo desde que el

Universo comenzó cuando ya existían las interacciones que hoy percibimos. De ser una sola empezaron a actuar de manera distinta y con características diferentes.

Tenemos razones para pensar que así fue. Dos de las Fuerzas fundamentales que conocemos: la Electromagnética y la Débil han sido ya enmarcadas como una sola interacción a la que llamamos Fuerza Electrodébil. Mas aún, hemos podido ver en el laboratorio cómo estas dos Fuerzas se unifican cuando se crean las condiciones que existían antes de que se separaran.

Existe también una manera de describir la Fuerza Electrodébil junto con la Fuerza Fuerte en lo que se llama Teoría de Gran Unificación. Con esta teoría se puede entender a las tres, aparentemente distintas Fuerzas (Electromagnética, Débil y Fuerte) como una sola Gran Fuerza Unificadora.

Sin embargo, el verdadero reto está en la conciliación que esperamos y deseamos entre las tres interacciones del mundo microscópico y la Fuerza Gravitacional. Esta Gran Unificación aún no ha llegado... o, ¿quizá sí?

La geometría y la física

Casi todo el mundo considera que la formulación de la Teoría de la Relatividad no es otra cosa que una geometrización de la gravedad. Esto significa que lo que antes consideramos como una Fuerza ahora es la deformación del espacio-tiempo. La Fuerza como algo invisible que afecta el estado de movimiento o reposo de los cuerpos desapareció para dejarnos la idea de que el espacio en el que nos

movemos se deforma y nosotros no tenemos otra manera de cambiar de posición diferente a la que ese espacio nos impone. Desde un punto de vista radical se acostumbra a decir que con la Teoría de la Relatividad General la física desapareció para dar paso a las matemáticas y más concretamente a la geometría. Sin embargo, hay voces como la de Steven Weinberg¹⁷ que intentan moderar la postura diciendo (Weinberg, 1972):

... tenía sentido darle a la geometría riemana un papel central en la descripción de la Gravedad. Pero con el paso del tiempo nos hemos dado cuenta de que no es posible esperar que la interacción Fuerte, Débil y Electromagnética puedan ser entendidas en términos geométricos, de tal manera que sobre-enfatizar la geometría solo oscurece la conexión profunda entre la gravitación y el resto de la física.

El mismo Albert Einstein se oponía a una interpretación geométrica de la realidad a través de la física. Se cuenta que en una carta de junio de 1948 a Lincoln Barnett (editor de la revista *Life Magazine*) escribió: «No puedo estar de acuerdo con la opinión extendida de que la Teoría de la Relatividad General geometrizó la física» (Vaas, 2016).

¹⁷ Steven Weinberg (1933) es uno de los constructores del modelo estándar de la física de partículas elementales. Recibió el Premio Nobel de Física en 1979.

Aunque otros lo intentaron, Einstein no, nunca se planteó un programa de geometrización de la física. Einstein estaba interesado en la unificación.

El mundo microscópico de las tres interacciones es descrito por la Mecánica Cuántica. Para hacerlo la Teoría Cuántica de la Materia se ha enriquecido con los conceptos más fundamentales que sustentan el marco teórico. El más importante de estos es el de simetría.

En la naturaleza estamos rodeados de simetrías y algunas de ellas se esconden de forma sutil. La simetría bilateral de nuestro cuerpo y de muchos animales, la simetría rotacional de la luna esférica, la que vemos en flores, frutos y hojas de muchas especies vegetales es tan ordinaria que a menudo pasa desapercibida. Nos hemos acostumbrado tanto a la presencia de objetos simétricos que no pensamos más en que esto podría ser la manifestación de algún principio profundo del Universo. Efectivamente las simetrías juegan un papel fundamental en la física de nuestros días.

No solo existen simetrías geométricas, la física fundamental ha descubierto otro tipo de simetrías presentes en la naturaleza. Así, por ejemplo, la manera en la que operan las Fuerzas que conocemos son el resultado de la «simetría de norma», que es una simetría que deja sin cambiar las ecuaciones matemáticas cuando transformamos un sistema de partículas de una manera determinada.

Las simetrías nos generan leyes de conservación y nos permiten entender el origen de las interacciones como condiciones del Universo para ser simétrico. Este es un resultado fantástico

descubierto por una matemática judío-alemana llamada Emmy Noether, que en 1918 publicó el teorema asombroso que conectó la carga eléctrica, el momento, la energía de partículas elementales, entre otros, con propiedades geométricas.

En su teorema establece que las simetrías continuas en un sistema físico están siempre conectadas con una Ley de Conservación. Así, por ejemplo, la Ley de Conservación de la energía se debe a que las leyes de la física no cambian ante la translación en el tiempo. Es decir, la energía se conserva porque las ecuaciones que nos decían cómo se mueven los objetos, son las mismas ayer que hoy. Las ecuaciones de movimiento permanecen iguales cuando hacemos una translación en el tiempo y decimos pues que esas ecuaciones son simétricas ante esta transformación temporal de la misma manera como un círculo sigue siendo círculo si lo rotamos tanto como queramos. De manera parecida, el hecho de que las ecuaciones que nos describen el movimiento de los objetos sean las mismas aquí que donde se encuentra usted, nos conduce a la conservación del «momentum». El momentum es «la cantidad de movimiento» y viene dado por la multiplicación de la masa del objeto por su velocidad.

En la física de partículas elementales se han descubierto muchas simetrías que explican el comportamiento de las interacciones. Algunas son aproximadas y entonces se dice que la simetría está rota por algún motivo, de tal manera que en la ausencia de esta causa de la ruptura el Universo sería simétrico. En su esencia el Universo lo es, pero la aparición de nuevos fenómenos oculta las

simetrías de fondo. Así, por ejemplo, los quarks «u» y «d» parecen ser dos aspectos de una misma cosa. Decimos que existe una simetría de intercambio de estos quarks que se llama «simetría de isospín». Esto quiere decir que, si cambiamos todos los quarks «u» por quarks «d» en un arreglo de quarks dado, entonces tendremos el mismo tipo de arreglo. Esta simetría existe, pero está rota por la aparición de otros fenómenos en la naturaleza, como la interacción electromagnética, que hace distinguible a un arreglo de quarks «u» y «d». Así, por ejemplo, conocemos como protón, con carga positiva, a un arreglo de dos quarks «u» y un quark «d»; por otro lado, llamamos neutrón a un arreglo de dos quarks «d» y un quark «u». Este último arreglo no tiene carga eléctrica y lo llamamos neutrón, pero sería fácil obtener un neutrón a partir de un protón si los quarks «u» y «d» fuesen intercambiables. De no tener electromagnetismo en la naturaleza, los neutrones y los protones serían la misma cosa¹⁸.

El teorema de Noether refleja una propiedad geométrica profunda de la naturaleza. De alguna manera, nos recuerda a las propiedades geométricas que la Teoría de la Relatividad General incorpora. Las simetrías que han sido verificadas y que corresponden a leyes de conservación se resumen en la tabla que extraemos solo en parte de la referencia (Vaas, 2016).

¹⁸ En realidad, esta simetría está escondida por el hecho adicional de que existe una diferencia en la masa de los quarks «u» y «d». Esto también acaba dando una masa distinta para protones y neutrones.

Esta y otras simetrías relacionan a partículas de un tipo llamadas fermiones con las del mismo tipo. Una simetría similar a la que sostienen los quarks «u» y «d» se manifiesta de forma diferente entre los W^\pm y Z^0 , que son bosones. Sin embargo, los campos fermiónicos y bosónicos son tan distintos que no existe una simetría ordinaria que los relacione entre sí. Existe no obstante una simetría más allá de lo ordinario que sí lo hace; se la conoce como supersimetría.

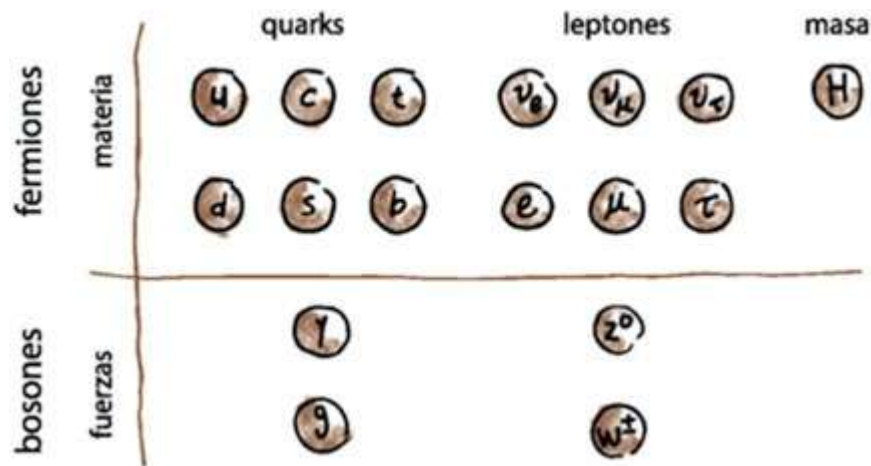
El concepto de simetría es tan poderoso que seguimos buscando su manifestación armoniosa en todo lo que vemos. Es por eso que uno de los objetivos más ambiciosos de la investigación en partículas elementales de nuestros días es la búsqueda de esta relación entre bosones y fermiones, es decir una relación entre los campos de Fuerza y los de materia. La supersimetría es una simetría superior. La posible existencia de una simetría así en el Universo fue propuesta en la década de los setenta, pero hasta la fecha su búsqueda experimental ha sido infructuosa.

Las partículas elementales de las que está hecho todo en la naturaleza son de dos tipos:

- Los fermiones, que hacen la materia del mundo (quarks y leptones).
- Los bosones, que generan las Fuerzas (fotones, gluones, W^\pm y Z^0).

Los fermiones son individualistas y solitarios. En un mundo microscópico dominado por la mecánica cuántica nunca se verá a

dos fermiones compartiendo el mismo estado, es decir, nunca poseen los mismos números cuánticos que los describen, ni tendrán la misma posición en el espacio. Se puede presionar a un contenedor lleno de fermiones idénticos para que estos se condensen, pero eso no se logrará nunca.



La materia está hecha de fermiones (campos de materia) y bosones (campos de Fuerza).

Por el contrario, los bosones son sociales y se agrupan en el mismo estado. Si se logran las condiciones adecuadas, se agrupan formando un condensado. Tal es el caso de los rayos láser que están formados de bosones llamados fotones.

El modelo estándar que fue descrito en el capítulo anterior se puede supersimetrizar, es decir podemos extenderlo imprimiendo en él la necesidad de una simetría mayor que lo haga supersimétrico. Existen muchas maneras de hacerlo, pero la más sencilla se llama Modelo Súpersimétrico Mínimo.

¿Qué se logra con esta extensión?

La supersimetría unifica de manera exacta las tres interacciones del modelo estándar y proporciona candidatos de materia que podrían dar cuenta de la materia oscura. Puede además explicar la asimetría primordial entre materia y antimateria al mismo tiempo que evita efectos indeseados, como la desintegración del protón, que no han sido observados.

Sin embargo, la predicción de una plétora de nuevas partículas (súpercompañeras de todas las que conocemos) aún no ha sido corroborada en el experimento que podría hacerlo. El Gran Colisionador de Hadrones busca desde hace ya varios años las elusivas partículas supersimétricas.

Gravedad cuántica

Para algunos investigadores explicar la Fuerza de gravedad en términos generales junto a las otras interacciones implica extender la Teoría de la Relatividad General al mundo microscópico. Para otros debe ser la mecánica cuántica la que debe ser incorporada al esquema geométrico del espacio tiempo. A estos intentos se los conoce como Teorías del Campo Unificado, Teorías Súper Unificadoras o Teorías del Todo. Actualmente tenemos dos grandes vertientes:

1. Teoría de Cuerdas, en la que se introducen objetos microscópicos extendidos (cuerdas) que al interaccionar entre sí generan las cuatro Fuerzas.

2. Gravedad Cuántica de Lazos, en la que se piensa en el espacio-tiempo como algo que se puede fragmentar. En esta manera de aproximarse, el espacio y el tiempo no son continuos. A escalas muy pequeñas el espacio-tiempo se vería como una esponja con huecos. Con esta manera de ver el tiempo y el espacio se puede luego implementar la Fuerza de gravedad como el intercambio de partículas, tal y como se hace para entender las interacciones débil, fuerte y electromagnética. Esta manera de entender la Fuerza en el caso de la gravedad implicaría la existencia de una partícula mediadora, como es el fotón para la interacción electromagnética, los bosones W y Z para la interacción débil o el gluon para la interacción fuerte. A la partícula mediadora se la ha denominado gravitón, pero hasta ahora no existe ninguna evidencia de su existencia.

Teoría de cuerdas

Para la Teoría de Cuerdas, todas las partículas que hoy vemos como elementales no son sino vibraciones de una pequeña cuerda. Si los protones son del tamaño de un fermi (10^{-15} metros), un quark es menor que 10^{-19} metros, y la cuerda que la forma será del orden de 10^{-34} metros; es decir, las cuerdas son inalcanzables. En este aspecto inaprensible de la Teoría de Cuerdas están las trincheras de sus detractores. Las cuerdas son tan pequeñas que el átomo es enorme comparado con ellas. El átomo es tan grande ante la cuerda como el Universo entero lo es ante los átomos. Según la teoría, estos

pequeños cordeles están vibrando y los diferentes modos de vibración corresponden a los distintos tipos de partículas.

Un aspecto intrigante de la Teoría de Cuerdas es que predice la existencia de más dimensiones. La posibilidad de construir teorías cuánticas consistentes con estos filamentos diminutos hace necesaria la introducción de un espacio-tiempo con más dimensiones de las que aparentemente habitamos.

Para la Teoría de Cuerdas «bosónicas» —primera versión de la teoría en la que las cuerdas tienen un giro especial que las hace ser calificadas como bosones, en contraposición con las que por razón de su giro diferente serían fermiones—, las dimensiones espaciales deben ser veintiséis, mientras que para las Teorías de Súper Cuerdas —versión más reciente— es de diez dimensiones espaciales. Aunque no deja de ser una conspiración poco aceptable para los críticos de la Teoría de Cuerdas, el embrollo se puede resolver enredando las dimensiones en escalas muy pequeñas para explicar por qué estas dimensiones no aparecen en nuestras vidas.

No es la primera vez que los físicos recurren a este tipo de artificios. Incluso los más conservadores de nuestros colegas teóricos recuerdan que ya en 1919 un matemático alemán llamado Theodor Kaluza advirtió que es posible unificar al electromagnetismo con la gravitación en cinco dimensiones. Pocos años después, en 1926, Oskar Klein explicó por qué no observamos la quinta dimensión en nuestro diario vivir.

En aquel entonces las ideas de Kaluza y Klein resultaban tan sugerentes que mucha gente se puso a trabajar en ellas para ver si,

revisadas en detalle, describirían nuestro mundo. Albert Einstein, Theodor Kaluza, Oscar Klein y muchos otros trabajaron en esto. Después de varios años de investigación, la gente comenzó a decepcionarse debido a que en esta descripción no se pueden entender muchos otros aspectos de la naturaleza.

La Teoría de Cuerdas revive aquellas primeras ideas en que se ocuparon dimensiones extra para dar consistencia a la teoría.

En 1997 un físico teórico argentino llamado Juan Maldacena inició una revolución en la Teoría de Cuerdas al proponer una relación entre teorías que aparentemente no tenían ningún vínculo. Una de las dos teorías es parecida a nuestra muy familiar Cromodinámica Cuántica que usamos en las cuatro dimensiones de nuestro planeta —es decir, tres dimensiones espaciales y una temporal—, para describir el mundo de los quarks y los gluones que forman un plasma que se produce en los experimentos del Gran Colisionador de Hadrones en el CERN. La otra es una Teoría de Cuerdas que habita un espacio de cinco dimensiones y que describe a la gravedad. Este espacio es llamado anti-De Sitter, en memoria de un matemático holandés llamado Willem De Sitter, quien trabajó con Albert Einstein en la posible existencia de objetos que no emitirían luz conocidos como agujeros negros. De Sitter también propuso un Universo esférico sin materia al que se lo llama Universo De-Sitter. Ahora decimos anti-De Sitter para referirnos a un Universo con la misma curvatura que el esférico de De Sitter, pero negativa. El espacio anti-De Sitter es pues un Universo abierto con geometría hiperbólica.

La dualidad de Maldacena es un ejemplo más de muchas dualidades que tenemos en la física. Una dualidad es una relación entre dos situaciones que se ven diferentes pero que realmente son equivalentes.

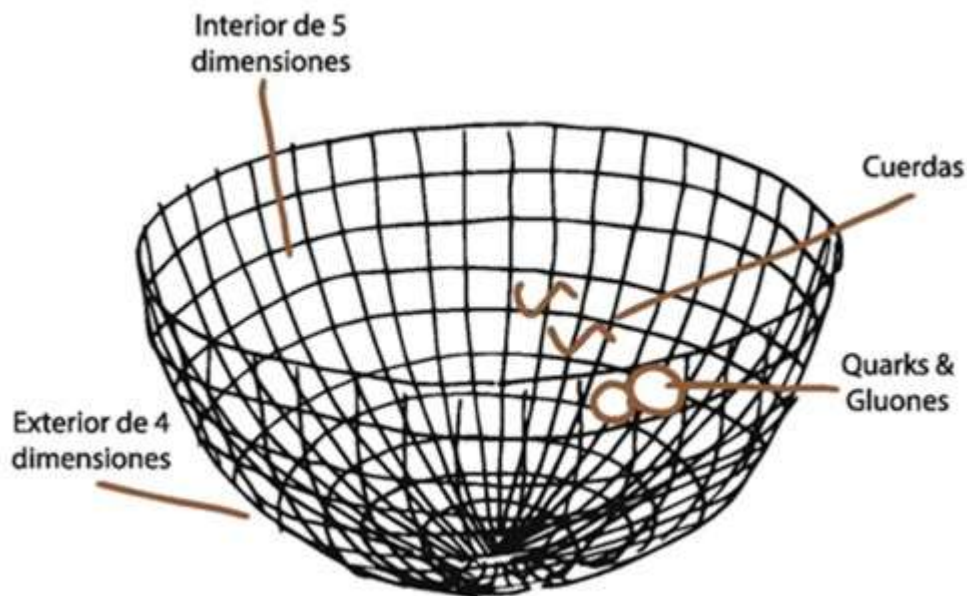
En la dualidad de Maldacena, y de manera asombrosa, cuando las partículas de nuestro mundo en cuatro dimensiones interactúan muy fuertemente entre sí, como lo hacen los quarks y gluones, el equivalente de la Teoría de Cuerdas Multidimensionales se simplifica y se puede resolver de manera exacta.

Lo que ocurre en este espacio de cinco dimensiones está relacionado con la fenomenología del plasma. Así, por ejemplo, el movimiento del extremo de una cuerda en el interior de este espacio corresponde a la propagación de un quark por el plasma. La propagación del quark puede ser medida y la medición puede ser entonces comparada con el movimiento de la cuerda en el espacio anti-De Sitter.

El equilibrio térmico del plasma está conectado con la aparición de un agujero negro en este espacio de curvatura negativa. La «extinción de jets»¹⁹ que se ha observado en los experimentos ATLAS y CMS del Gran Colisionador de Hadrones corresponde a la caída de

¹⁹ Cuando dos protones colisionan en el Gran Colisionador de Hadrones a menudo aparecen eventos en que se generan dos chorros de partículas volando en direcciones opuestas. Estos eventos son conocidos, se deben a la presencia de dos quarks que se convierten en muchas partículas que siguen la dirección de vuelo del quark. Sin embargo, se ha podido observar que en algunas ocasiones uno de los dos chorros desaparece. La explicación es que el quark que lo hubiese generado pierde toda su energía en un plasma de quarks y gluones. Esta pérdida de energía le quita al quark la capacidad para producir el chorro.

la cuerda en este agujero negro. Para cada situación en el laboratorio de cuatro dimensiones, quarks y gluones, sin gravitación, hay un acontecimiento en el mundo de cinco dimensiones con geometría caprichosa.



La dualidad de Maldacena establece una equivalencia entre dos mundos: uno matemático de cuerdas en cinco dimensiones, donde la gravedad convive con las otras interacciones y uno de cuatro dimensiones donde habita un plasma de quarks y gluones que puede ser descrito por la Cromo Dinámica Cuántica que conocemos.

Si esta conjetura es real, entonces nuestro Universo existe en dos formas equivalentes. Si la dualidad se verifica, implicaría que nuestras experiencias aquí están estrechamente ligadas con una realidad (o virtualidad, no lo sabemos) distante en un mundo paralelo de más dimensiones. Los fenómenos de estos Universos

paralelos estarían tan íntimamente ligados como lo estamos nosotros a nuestra propia sombra. Cuando dos iones de plomo se encuentran a energías ultrarelativistas se genera un plasma de quarks y gluones en el laboratorio y al mismo tiempo, en un Universo matemático, aparece un agujero negro. Entonces por un instante podemos ver un Universo equivalente descifrado en ese plasma líquido que se genera en la colisión. Podemos percibir en el movimiento de cada quark, de la mezcla primordial de quarks y gluones, una quinta dimensión. Podemos ver a la gravedad en un mundo cuántico como una ilusión impresa en el holograma que es el plasma que dio origen al Universo.

La gravedad cuántica de lazos

Esta teoría fue propuesta en 1986 por Abhay Ashtekar, físico de origen hindú que trabaja en los Estados Unidos, Ted Jacobson de la Universidad de Maryland y Carlo Rovelli de la Universidad del Mediterráneo en Marsella, Francia. A diferencia de la Teoría de Cuerdas, la gravedad cuántica de lazos está en una etapa de desarrollo en la que aún no se incorpora la física de las interacciones de partículas elementales. Sin embargo, sus promotores dicen que la manera de formular la gravedad es idéntica a la manera como se hace con las interacciones en el modelo estándar de las partículas elementales, es decir con el intercambio de partículas que hemos estado comentado. Por eso es que hay optimismo en que su incorporación dará buenos resultados.

La gravedad cuántica de lazos es considerada la mejor alternativa a la Teoría de Cuerdas. Comienza con la Teoría de la Relatividad General a la que se aplican las reglas cuánticas, haciendo que el espacio y el tiempo sean discretos, no continuos.

¿Qué significa esto? Aunque percibimos el espacio-tiempo de manera continua la teoría postula que a nivel de la escala de Planck (Smolin, 2006) este se granula en diminutos lazos. Estos trozos de espacio-tiempo de 10^{-35} metros de diámetro están entretreídos formando una espuma. Si la discontinuidad del espacio y del tiempo fueran macroscópicas nosotros percibiríamos Fuerzas que nos empujan a permanecer en determinadas regiones, imposibilitando el acceso a otras. Por supuesto no habría tales Fuerzas, lo que sentiríamos sería solo el efecto de la geometría del espacio en que vivimos. Para ir de un lado a otro tendríamos que tomar una ruta caprichosa que mostraría los cambios abruptos del espacio.

La gravedad cuántica de lazos propone una naturaleza tal del espacio-tiempo, pero lo hace a una escala tan pequeña que no podemos percatarnos.



1 billonésima de centímetro
i.e. 0.000 000 000 001 centímetros
i.e. 10^{-12} cm



1 millonésima de yocto-centímetro
i.e. 0.000 000 000 000 000 000
000 000 001 centímetros
i.e. 10^{-30} cm

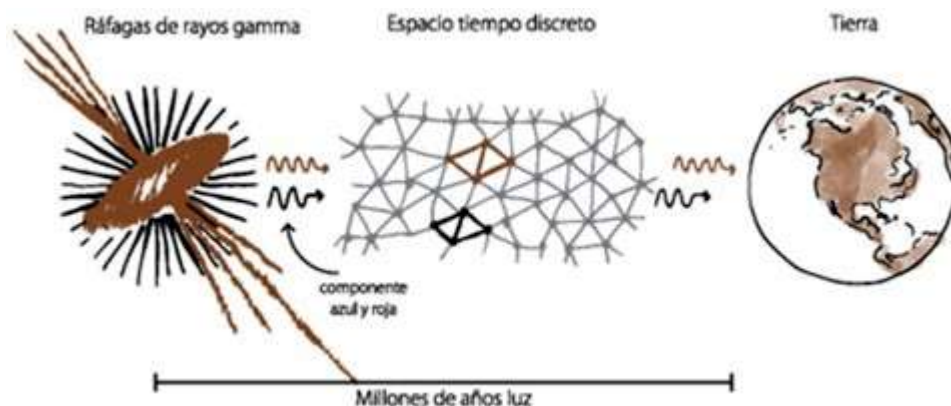


1 escala de Planck
i.e. 0.000 000 000 000 000 000 000 000 000 001 centímetros
i.e. 10^{-33} cm

La textura del espacio a diferentes escalas según la Teoría Cuántica de Lazos. Para nosotros es continuo, como se ve a la izquierda, pero si nos pudiésemos acercar de manera considerable, veríamos la textura que se ve en el cuadro a la derecha. Con un espacio-tiempo así, fragmentado e irregular, no podríamos llegar a otro lugar de la geografía caminando en línea recta. Nuestra trayectoria sería tan caprichosa como la geometría del espacio-tiempo porque uno no puede moverse por donde no hay espacio.

La gravedad cuántica no hace uso de más dimensiones que las que ya conocemos. Mientras que la Teoría de Cuerdas se desarrolla en el marco de espacio-tiempo ajeno, la gravedad de lazos ya incluye al espacio-tiempo en ese marco y es por tanto independiente del sustrato. Esta es una gran ventaja de la gravedad cuántica de lazos, que propone una estructura del sustrato mismo en que habita.

Hay manera de poner a prueba la veracidad de la estructura del espacio-tiempo que usa la Teoría de Gravedad Cuántica de Lazos. Un fotón seguirá una trayectoria diferente a la que sigue en un espacio-tiempo continuo. La teoría predice que fotones con más energía viajarán más rápido que los fotones con menor energía. El efecto es pequeño por lo que se debe observar luz extra galáctica de explosiones de rayos gamma. Puesto que los fotones tienen diferente velocidad, unos llegarán antes que otros. Para hacer que este hecho no entre en conflicto con la Teoría de la Relatividad, que postula una velocidad de la luz constante y universal, los promotores de la teoría han desarrollado modificaciones de la teoría convencional que acomoda a los fotones que viajan a diferentes velocidades. Estas modificaciones proponen que la velocidad universal de la Teoría de la Relatividad es la de los fotones de baja energía. Actualmente hay otras propuestas experimentales para poner a prueba la estructura discreta del espacio-tiempo.



Propuesta de verificación experimental tomada de la referencia (Smolin, 2006) para la estructura de lazos del espacio-tiempo.

En 2007, el telescopio MAGIC (por sus siglas en inglés: *Major Atmospheric Gamma-ray Imaging Cherenkov*) de las Islas Canarias, así como el HESS (High Energy Stereoscopic System) en Namibia, reportaron que los fotones de más baja energía que provienen de explosiones de rayos gamma llegaron antes que los de alta energía (Ananthaswamy, 2009), es decir lo opuesto de lo esperado de la Teoría de Gravitación Cuántica de Lazos. El efecto inesperado puede ser explicado con la demora que puede existir en la emisión de la fuente.

Otras mediciones en la polarización de la luz han descartado la granularidad del espacio-tiempo. Mucha gente espera mejores observaciones con fuentes más distantes y con fotones más separados en energía.

La Teoría de Cuerdas nació de la física de partículas, mientras que la gravedad de lazos nace de la Teoría de la Relatividad General. Una postula una teoría cuántica en la que la gravedad aparece, mientras que la otra toma la Teoría de la Relatividad General y la «cuantiza» para luego incorporar las interacciones de las partículas elementales.

Algunos llaman átomos de espacio a la estructura discreta que propone la Teoría Cuántica de Lazos y estos representan la unidad de volumen más pequeña que puede existir en la naturaleza con las dimensiones de la escala de Planck.

Entre la Teoría de Cuerdas y la Teoría Cuántica de Lazos no sabemos cuál es la correcta. Podría ser que ninguna de ellas, pero

también podría ser que ambas tengan aspectos complementarios que nos lleven al esquema de unificación que buscamos.

Capítulo 19

La quinta fuerza

*«Un misterio infinito la Fuerza es.
Mucho por aprender aún queda».*
YODA, Star Wars, Episodio V.

Creemos que en el fondo de las cosas existe solo una Fuerza en la naturaleza. Es posible que con el paso del tiempo esa Fuerza se fuera desdoblando en otras para dar la apariencia de cuatro distintas.

La interacción débil es estudiada a detalle en los grandes aceleradores del mundo. Es la responsable de que el Sol produzca luz y calor. Los elementos inestables que decaen emitiendo radiación lo hacen como consecuencia de la interacción débil actuando a nivel microscópico. La interacción fuerte es también estudiada en aceleradores como el Gran Colisionador de Hadrones. Esta Fuerza une a los quarks para formar protones y neutrones que a su vez constituyen los núcleos atómicos. La Fuerza Electromagnética es la que más familiar nos resulta y la hemos entendido al grado de que nos permite aprovecharla en muchas aplicaciones tecnológicas. La Fuerza de Gravedad también es muy conocida y es también de utilidad en la generación de energía y en el control de muchos procesos.

La búsqueda de una quinta Fuerza, más allá de las cuatro conocidas, es una de las grandes vertientes de la investigación en física desde hace mucho tiempo.

Como hemos visto, tres de las Fuerzas pueden ser entendidas como el efecto que campos mediadores realizan entre las partículas de materia. Estos campos intermediarios se manifiestan como partículas que han sido observadas y estudiadas. Como dijimos antes la Fuerza Electromagnética, tiene al fotón como portador. Este es la manifestación corpuscular de la luz y la materia con carga eléctrica los emite para llevar la Fuerza a su contraparte de materia cargada eléctricamente. El fotón es pues el mensajero que conduce la interacción electromagnética y es el que determina que las cargas de signos opuestos se atraigan y las de mismo signo se separen.

La existencia de una quinta Fuerza en la naturaleza sería bienvenida por muchos que intentan explicar fenómenos raros. Así, por ejemplo: uno de los problemas de la física moderna es el hecho de que, aquello que podemos «ver y tocar» en el Universo, es apenas un 4 % de lo que está ahí. El resto es algo extraño que hemos llamado materia y energía oscuras.

¿Cómo nos enteramos de la presencia de una sustancia tan misteriosa e invisible?

A pesar de ser tan elusiva a nuestros detectores, la materia oscura es sensible a la gravedad. Ese hecho circunstancial tiene efectos visibles en la rotación de las galaxias. El movimiento de las estrellas delata la presencia de cantidades significativas de esta enigmática sustancia.

Aparte de la gravedad, las otras Fuerzas no parecen tener noticia del indescifrable componente del Universo. Siendo tan abundante, no es impensable que la materia oscura forme grumos y estructuras

bajo la influencia de la gravedad y quizá, ¿por qué no?, bajo los efectos de interacciones desconocidas.

Si la materia y la energía del Universo permanecen ocultas a nuestros aparatos y métodos de medición ¿por qué no habrían de hacerlo otras Fuerzas?

En el 4% del contenido total del Universo actúan cuatro Fuerzas: ¿por qué no pensar que en el 96 % restante puedan existir otras interacciones?

La materia y las interacciones que conocemos han dado origen a las estructuras de la naturaleza que vemos e intentamos comprender, pero la materia, la energía y las Fuerzas desconocidas en ese mundo oscuro podrían estar generando arreglos y formas que no vemos.

La existencia de una partícula mediadora de una quinta Fuerza contribuiría al inventario de materia en el Universo. En general, observar partículas adicionales que no estaban en el registro, ayudaría a completar el inventario de lo que está y que no hemos visto. Sin tener en cuenta su presencia no será posible entender la naturaleza y organización de todo lo que nos rodea.

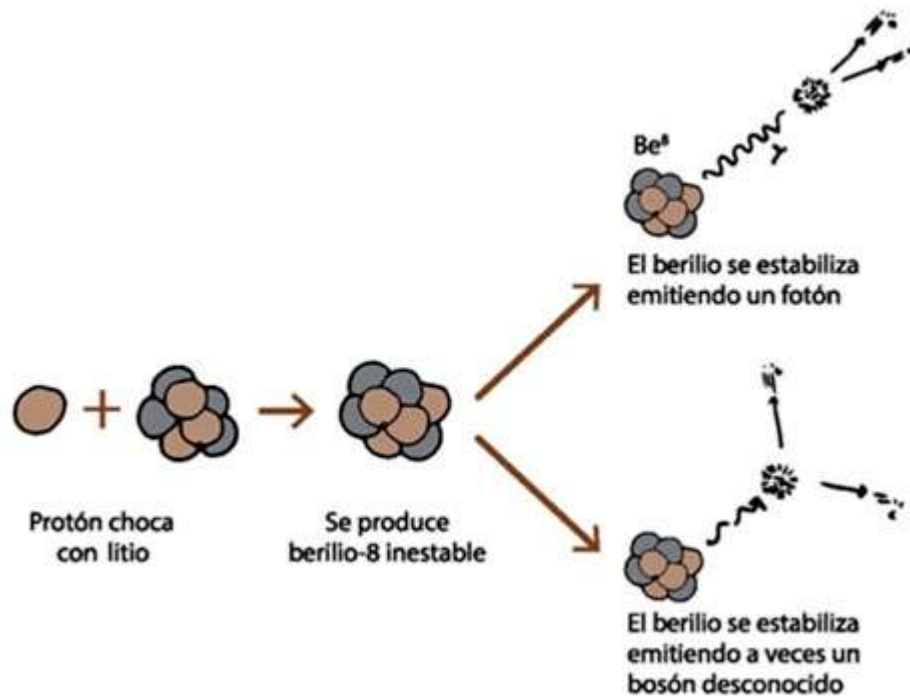
La existencia de una quinta Fuerza ayudaría también a explicar algunas desviaciones de los valores medidos en la física de partículas elementales cuando se comparan con el Modelo Estándar, que es el marco teórico que tenemos para explicar el mundo microscópico. Este modelo del mundo microscópico ha sido muy exitoso como descripción de la materia y sus cuatro interacciones, pero los efectos de una quinta Fuerza, aunque

marginales, podrían explicar sutiles desviaciones en algunas mediciones.

Hace tiempo un grupo de científicos de la ciudad Debrecen, en Hungría (Krasznahorkay, 2016), reportó lo que podría ser una señal de la quinta Fuerza. El experimento muestra uno de los métodos utilizados en la búsqueda de más interacciones. La investigación pasó desapercibida por un tiempo hasta que un grupo de físicos teóricos de los Estados Unidos analizó el trabajo para sacarlo nuevamente a la luz.

El grupo de físicos húngaros bombardea protones contra una hoja delgada de litio. El litio es un elemento ligero que al capturar al protón produce átomos inestables de berilio. Una vez producidos, los átomos de berilio emiten luz y esta a su vez produce pares de electrón y positrón, como se muestra en la figura.

El positrón es la antipartícula del electrón y uno podría referirse a él como antielectrón si no fuera porque, habiendo sido la primera de las antipartículas observadas, recibió ese nombre especial. Cuando el antielectrón o positrón se encuentra con un electrón se aniquila produciendo un destello. El proceso inverso también es posible, es decir, la luz desaparece para dar lugar a un positrón y un electrón que vuelan en direcciones opuestas. Esto es lo que ocurre con la luz que se desprende del berilio producido en el laboratorio de manera artificial.



La producción de berilio inestable se logra haciendo chocar un protón contra un átomo de litio. El berilio decae emitiendo un fotón, pero ocasionalmente se estabiliza decayendo en una partícula mediadora desconocida. Las dos posibles maneras de decaer del berilio se ilustran en el lado derecho de la figura.

El berilio es radiactivo, es decir, que después de un tiempo emite lo que conocemos como radiación gamma —otra manera de llamar a los fotones—. Lo que el grupo de científicos reportó es que de vez en cuando también emite una partícula diferente de lo que conocemos como radiación gamma. Esta nueva partícula es muy ligera y se desintegra también en electrones y positrones de la misma manera que los fotones normales. Se piensa que esta nueva partícula podría ser el «Fotón Oscuro» que ha sido buscado por mucho tiempo.

Analizando las reacciones, este grupo de científicos pudo determinar la masa del objeto nuevo. La masa del hipotético fotón oscuro sería de treinta y cuatro veces la masa del electrón (que en las unidades que usan los físicos es 17 MeV). Es tan ligera que sería la más ligera de cuantas existen en el catálogo de las partículas elementales. Lo interesante del anuncio que advirtió de la presencia de este nuevo corpúsculo es que podría ser el portador de una nueva interacción que actúa a distancias microscópicas. No se trataría pues de una fracción de materia sino de un campo de Fuerza que se manifiesta como una partícula mensajera.

Físicos teóricos de la Universidad de California en los Estados Unidos encontraron mucho sentido en la medición y calcularon que esta produciría una Fuerza con alcance medio de 12×10^{-15} metros (es decir doce fermis). Esta es una distancia muy pequeña si consideramos que un protón se extiende poco más de un fermi. Es decir que más allá de una distancia equivalente a una decena de protones la Fuerza es imperceptible. Por si esto fuera poco, la hipotética quinta Fuerza parecería ser tan débil como la gravedad.

Si la observación fuera correcta pronto debió ser verificada en otros experimentos, y esto no ha ocurrido. El laboratorio Jefferson de los Estados Unidos aloja el experimento DarkLight, que busca partículas de este tipo en un amplio intervalo de masas. Los investigadores decidieron de inmediato enfocar sus esfuerzos en la región de masa del nuevo bosón donde se lo podría encontrar, pero no se pudo confirmar la observación del grupo europeo.

También el Gran Colisionador de Hadrones echó una mirada a sus datos. El acelerador proporciona colisiones de protones a cuatro experimentos y uno de ellos, llamado LHCb, pudo haber dicho algo después de buscar en sus datos a la hipotética partícula, pero desafortunadamente no pudo confirmar la medición.

Sin embargo, es una historia que ilustra muy bien una de las vertientes de la investigación actual, que busca más interacciones en la naturaleza. Existen otras maneras de hacerlo.

Desde hace mucho tiempo se buscan desviaciones ligeras en el comportamiento de la gravedad. En la década de los ochenta (Fischbach, *et. al.*, 1986), un grupo de investigadores reportó haber observado efectos de la quinta Fuerza al medir la atracción de dos cuerpos entre sí. Sin embargo, no ha sido posible duplicar el resultado desde entonces. En un artículo más reciente, Fishbach dice (Fischbach, 2015):

Han pasado aproximadamente treinta años desde nuestra publicación en *Physical Review Letter* y ahora sabemos que la quinta Fuerza con los atributos que asumimos entonces no existe.

Para los interesados en esta historia, la reciente publicación de sus recuerdos puede ser una lectura muy recomendable.

Capítulo 20

La gravedad y el cine

Gravedad²⁰

La relación desavenida entre Hollywood²¹ y la ciencia es legendaria. Esa tradicional enemistad entre ambas visiones del mundo no se funda, como muchos pensarían, en el desdén por la ciencia de parte de los que se dedican al séptimo arte, sino al hecho más trivial de que el mundo del cine es escéptico a la posibilidad de que se pueda congeniar al espectáculo con la realidad. No obstante, a todos nos complace el que dos mexicanos se llevaran el Oscar con la dirección y la fotografía de la película *Gravedad*.

Gravedad, ganadora de siete premios Oscar de la Academia, se estrenó en 2013 en los Estados Unidos. En la cinta, la Dra. Ryan Stone viaja al espacio con el transbordador Explorer acompañada del experimentado astronauta al mando de la misión, Matt Kowalski. En pleno proceso de reparación del telescopio Hubble, ambos reciben la noticia de la destrucción de un satélite ruso, que origina una cascada de catástrofes al producir una gran cantidad de fragmentos que al orbitar amenazan todo cuanto se encuentre a su paso. La comunicación con Houston se pierde y así inicia una aventura de supervivencia a seiscientos kilómetros de altura. De la

²⁰ Película británica-estadounidense de ciencia ficción producida y dirigida por Alfonso Cuarón y ganadora de siete premios Oscar de la Academia.

²¹ Para simplificar en una sola palabra lo que significa la industria de cine norteamericano.

terrible catástrofe solo Ryan se salvará, Matt Kowalski se sacrifica para que así sea.

La película fue nominada a diez premios Oscar y recibió muchos otros galardones en numerosos festivales de cine en el mundo entero. De particular impacto en México fueron los premios Oscar en las categorías de mejor director para Alfonso Cuarón, mejor fotografía para Emmanuel Lubezki y mejor montaje para Alfonso Cuarón y Mark Sanger.

Hay muestras de espectáculo que no violan las leyes de la física, el circo es una de ellas. La carpa itinerante demuestra, en tiempo real, que las maravillas de la perseverancia, el entrenamiento, la destreza y la imaginación pueden hacer las delicias del espectador. Por otro lado, los ilusionistas, magos y prestidigitadores engañan a los sentidos haciendo creer que han burlado los principios de la naturaleza. Sin embargo, si de mentir se trata, el cine tiene la palabra. La industria de la gran pantalla tiene todos los recursos para hacerlo y sería un desperdicio no aprovecharlos. «Sin mentiras la humanidad moriría de desesperación y aburrimiento», decía Anatole France²².

Muchos quisieran que la imaginación no se pervirtiera transfigurándose en un capricho sin ton, ni son. Algunos quisieran que la imaginación conservara un vínculo con la realidad. Pero en la

²² Anatole France (1844-1924) escritor francés reconocido con el Premio Nobel de Literatura en 1921.

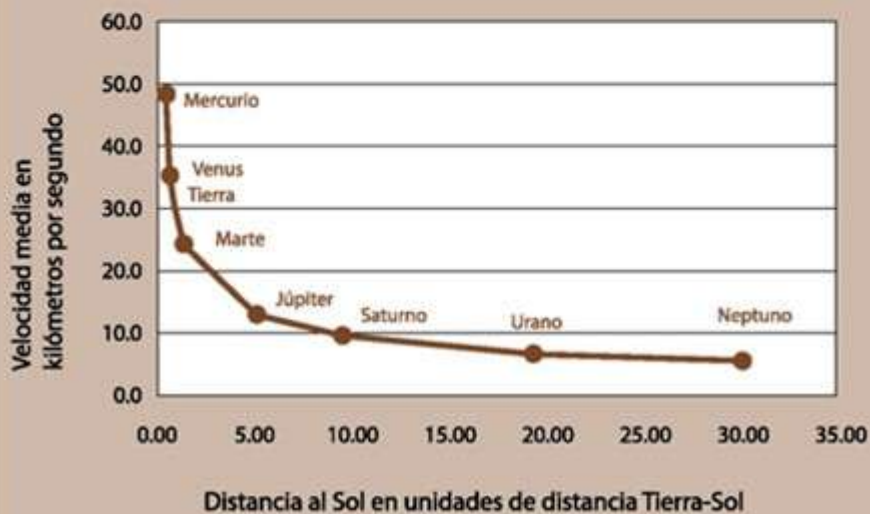
pantalla grande caben muchas cosas y ahí, la realidad puede llegar a tener un lugar, pero nunca más del necesario.

Tener objetos que circulan alrededor de nuestro planeta a una velocidad tal que alcanzan a otros en la misma órbita, para luego volver, noventa minutos más tarde, a golpearlos nuevamente, después de haber dado la vuelta a la Tierra, es algo que viola las leyes de la gravedad con flagrancia. Si un objeto orbita a mayor velocidad entonces el radio de su órbita será menor que aquel que lo hace con lentitud. Esta falacia central de la película es lo que más la lastima y es, quizá, el disparate mayor que casi llega a entorpecer la atención a las escenas que siguen. La trama se tambalea, pero no se cae, se recupera pronto con las maravillosas imágenes, el sonido impecable y la fascinación del espacio.

Los objetos en órbita no pueden guardar la misma distancia al cuerpo central que los atrae si tienen velocidades diferentes. Cuanto más cercanas las orbitas al centro mayor será la velocidad.

El sistema solar es un ejemplo.

Objeto	Distancia al Sol en unidades de distancia Tierra-Sol	Velocidad media Kilómetros/segundo
Mercurio	0.39	48.0
Venus	0.72	35.4
Tierra	1.0	30.0
Marte	1.52	24.3
Júpiter	5.20	13.2
Saturno	9.54	9.7
Urano	19.19	6.8
Neptuno	30.07	5.5



Lo que se ha dado en llamar «La ciencia de Hollywood» es algo muy distinto de lo que se hace en los laboratorios, universidades y centros de investigación, pero eso no debe incomodar a nadie. La

industria cinematográfica tiene sus propios códigos y su propio *savoir faire* que está refrendado por un éxito financiero incuestionable. No por nada decía Marilyn Monroe: «En Hollywood te pueden pagar mil dólares por un beso, pero solo cincuenta centavos por tu alma».

¡Un Oscar para la muerte más inexplicable en la historia del cine! La doctora Ryan Stone y el veterano Matt Kowalski se encuentran ya en la Estación Espacial Internacional después de viajar cientos de kilómetros con sus propulsores personales. Llegan con muy poco combustible remanente, pero consiguen una velocidad relativa igual a cero con la estación. De pronto aparece una Fuerza que tira del experimentado astronauta. ¿Qué misteriosa Fuerza jala a Kowalski hacia la muerte? ¿Por qué de pronto la cuerda se tensa y el avezado astronauta debe soltarla para morir con resignación? Entendemos que debe morir, porque un poco de tragedia nunca está demás y porque no esperaríamos menos de George Clooney. Sin embargo, morir por una breve excepción de las leyes físicas que uno obedeció sumisamente toda la vida, no es el tipo de muerte más divertido. Menos aún si uno tuvo un profesor estricto en la secundaria. La misteriosa Fuerza que jala a Kowalski hacia el espacio exterior no tiene sentido físico pero la idea del espacio infinito como sepultura es simplemente cautivadora.

Para dar una muerte más apropiada y, sobre todo de más altura a Kowalski, un especialista habría ideado una explosión en la que el efecto propulsor lleve a una parte de la estación espacial en una dirección y a Kowalski en la otra. Este es el mecanismo que mueve a

las naves en el espacio. Las turbinas hacen uso de la tercera ley de Newton para empujar cohetes en la dirección opuesta a la expulsión de gases en combustión. Una posición conveniente pondría a salvo a la Dra. Stone. Sin embargo, los especialistas obsesivos no ven que esta posibilidad razonada —que no recurre a Fuerzas misteriosas que jalan de la cuerda—, no le daría unos segundos a la pareja para una conversación dramática que es central en la historia. Peor aún, una explosión es un accidente y no la decisión de un hombre que da la vida por salvar a una mujer.

Los detalles imprescindibles del espectáculo escapan pues a los especialistas aburridos, que con certeza insistirán en que el pelo también obedece a las leyes de la física y que no podríamos tener a Sandra Bullock flotando en la ingravidez de su nave, pero con el pelo en su lugar para dar la imagen que siempre queremos ver de Sandy.

Las órbitas de la Estación Espacial Internacional y la del Telescopio Hubble son tan diferentes que ir de una a la otra sería imposible, pero ¿deben estas nimiedades detener la filmación de una película? No, las películas son espectáculo y no material educativo donde se transmite la ficha técnica con la información del ángulo de las orbitas, la altitud y la excentricidad de los satélites. El público sabrá detener por un momento sus exigencias de precisión y acompañará en una aventura imaginaria a Sandra Bullock, sobre todo si en lugar de usar el pañal de un astronauta hace uso de unas bragas ceñidas y una blusa verde que cuando se moja se pone azul.

El asesor científico de la película, el Dr. Kevin Grazier —astrofísico especializado en dinámica computacional de orbitas y asesor de otras producciones cinematográficas y televisivas— decía que su recomendación, ante la imposibilidad de ir de una órbita a la otra, fue la de crear un satélite ficticio que reemplazara al Hubble. Él mismo llegó a sugerir el Telescopio Espacial Cannon en honor —así lo planteó— al astrónomo Annie Jump Cannon. El Dr. Kevin comenta que Cuarón le dijo en esa ocasión: «Perdiste una llamada en la vida. Debiste ser productor». Sin embargo, la película fue fiel a la historia original con el Hubble como objeto de la misión.

Las estancias en el espacio, sin Gravedad, implican que el flujo sanguíneo sufra cambios importantes. Así, por ejemplo, una mayor cantidad de sangre de lo normal se va a la cabeza produciendo cefalea y mareos. Cuando los astronautas regresan a la Tierra, el súbito retorno a la gravedad hace que el flujo de sangre se vaya a los pies nuevamente ocasionando desmayos y trastornos de todo tipo. Es por eso que cuando aterrizan, los astronautas deben salir acostados y permanecer así por un tiempo para que el flujo de la sangre se normalice paulatinamente. En cambio, la doctora Ryan Stone sale caminando del lago, donde afortunadamente cayó su nave. Es verdad que muestra una cierta dificultad para caminar, pero no le toma mucho hacerlo después de una semana en el espacio exterior.

La especialización convierte a las personas en balanzas de precisión, incapaces ya de tolerar perturbaciones mínimas. Víctimas de su formación, los físicos y los ingenieros deben acostumbrarse a ver

cómo James Bond, en caída libre alcanza un carro —también en caída libre— para ponerse a salvo. *Gravedad* no quiso dejar de mostrar el fenómeno que descarta a Galileo de la historia del pensamiento y por eso podemos ver hacia el final de la película cómo un pedazo de la nave alcanza, en caída libre, a los demás.

El principio de equivalencia no tiene un lugar en la taquilla cinematográfica. Ya nadie se desconcierta, con las palomitas frente a la boca abierta que espera y espera la llegada del bocado, mientras los ojos abiertos ven cómo el protagonista salva su vida de una larga caída, gracias a que, justo antes del suelo, encuentra un lugar de donde asirse.

Pero con seguridad no solo los físicos, también los historiadores, los médicos y hasta los tiburones han sobrevivido los excesos y desproporciones de Hollywood en películas memorables. Sin embargo, no todos los profesionistas se incomodan en la sala cinematográfica en algún momento, el «más realista de los gremios», el de los políticos, disfruta la función a todo lo largo y ancho de la pantalla grande, que nos seguirá ofreciendo fantasía y final feliz.

Interestelar²³

La película *Interestelar* es más que la visión apocalíptica de un planeta devastado por plagas que consumen el oxígeno de manera

²³ Película estadounidense dirigida por Christopher Nolan, estrenada en el año 2014 y ganadora de un premio Oscar y cuatro nominaciones.

irremediable. Es también una representación de cómo los físicos actuales entendemos el tiempo.

Hemos visto que el espacio-tiempo se deforma con la presencia de los cuerpos que tienen masa. Sabemos que los objetos se acercan entre sí porque el espacio en el que se mueven se ha curvado en su presencia. Al hacerlo dan la impresión de que existe una Fuerza entre ellos a la que conocemos como gravitación. Las manzanas caen al suelo no por la acción misteriosa de una Fuerza invisible que actúa a distancia sino porque nuestro planeta con su presencia ha deformado el espacio y el tiempo al grado de convertirlo en un deslizadero en declive para los objetos que se mueven cerca de él.

Hay quienes consideran que el espacio-tiempo se puede llegar a curvar tanto que conectaría otras regiones del Universo a través de un túnel de espacio y tiempo conocido como «agujero de gusano».

En la época de *Interestelar* se ha descubierto que alrededor de Saturno gira una de estas deformaciones del espaciotiempo.

Por otra parte, no existe nada en la física de nuestros días que impida la existencia de más dimensiones que las que habitamos. En la historia de Christopher y Jonathan Nolan, la forma futura de los seres humanos es la extra-dimensionalidad, a la que llegaremos un día trascendiendo nuestro espacio de tres dimensiones. Estos seres extra-dimensionales a los que se suma Joseph Cooper —el protagonista— han creado el agujero de gusano que les permite regresar en el tiempo para salvar a la humanidad.

La posibilidad de regresar en el tiempo ha planteado siempre un problema lógico porque parecería violar el principio de causa y

efecto. El viajar al pasado nos daría la ocasión de modificar las cosas de tal manera que generemos una situación paradójica. La manera clásica de ilustrar este contrasentido es con el asesinato del abuelo. A este enredo se le conoce como «la paradoja del abuelo». Semejante crimen impediría nuestra propia existencia y por tanto arruinaría nuestros planes de cometer el homicidio. Sin embargo, esta contradicción se puede resolver evitando que los viajeros del futuro tengan injerencia en el pasado. *Interestelar* realiza esta opción de manera espectacular. Para esto encierra a Cooper en un hipercubo desde el que puede ver a su hija en el cuarto de su casa sin ser visto y en la angustiante impotencia de comunicación.

Luego la película regresa a la situación paradójica cuando después de muchas dificultades Cooper consigue enviar la información necesaria, desde su tesseracto, utilizando ondas gravitacionales. Esto lo convierte, a él mismo, en el fantasma de su hija.

Gracias a los mensajes codificados en el polvo de la habitación, Cooper logra intervenir en el pasado para que la humanidad sea evacuada a tiempo.

Después, el tesseracto se cierra y Cooper es liberado de su hiperdimensionalidad... o, mejor dicho: Cooper queda nuevamente atrapado en solo tres dimensiones después de su libertad extradimensional. La cárcel que lo sujeta a un menor número de dimensiones le permite regresar a través del agujero de gusano para que una nave espacial de la NASA lo rescate y lo lleve al reencuentro con su hija ya anciana.

Esta concepción del tiempo es la concepción de la Teoría de la Relatividad General y para los efectos de la vida nos dice que el pasado no se fue para siempre. Esta ahí junto con un final feliz.

La misión Rosetta, *Armageddon* e impacto profundo²⁴

En su novela de ciencia ficción *Un mundo feliz*, publicada en 1932, Aldous Huxley se anticipó al uso de antidepresivos. En 1952 estos comenzarían a ser parte de nuestras vidas y hoy forman parte indispensable del arsenal de fármacos que nos mantiene en circulación. Se adelantó también a la fecundación *in vitro* que en 1978 sería una realidad y pronosticó el anticonceptivo que llegaría en 1960 para convertirse en una revolución social generada en el laboratorio. Ahora es de uso cotidiano y fundamental para la sociedad.

En noviembre de 2014 escuchamos en los medios de comunicación las notas periodísticas de una impresionante hazaña científica en la que una sonda espacial se posaba sobre la superficie de un cometa. Después, la saga, que había comenzado en 2004, continuó para darnos un capítulo más de la asombrosa historia llamada Rosetta.

Unos años antes de que la misión Rosetta diera inicio, en 1998 la película *Armageddon* nos mostró en la pantalla grande la historia de Robert Pool y Jonathan Hensleigh, en la que un grupo de

²⁴ *Armageddon* es una película de 1998 dirigida por Michael Bay. *Impacto profundo* es una película del mismo año dirigida por Mimi Leder. Ambas manejan la misma trama catastrófica que amenaza a nuestro planeta, aunque la calidad de los conceptos es muy diferente entre ellas.

advenedizos salvó al planeta de la destrucción inminente que el impacto de un gigantesco asteroide provocaría. *Armageddon* fue tan mala que algunas personas tuvieron dificultades para permanecer en la sala de cine hasta el final. La banda de *rock* pesado Aerosmith la hizo más soportable con un *soundtrack* que sigue sonando. La canción «I Dont Want To Miss a Thing» le dio el tono melodramático a la relación amorosa entre la hija del líder de la expedición y uno de los jóvenes de su equipo.

La ciencia ficción de *Armageddon* despliega el heroísmo de hombres rudos y la incompetencia de los astrónomos profesionales y aficionados que no vieron un asteroide del tamaño de Texas sino dieciocho días antes del impacto. Un objeto con esas dimensiones se podría ver décadas antes, pero, claro está, eso reduciría de manera considerable el drama y las posibilidades teatrales. El asteroide de *Armageddon* tiene un diámetro de 1400 kilómetros y cuando solo faltaban dieciocho días para el impacto debía encontrarse treinta veces más cerca de nosotros que Ceres, el asteroide que siendo el más grande del cinturón solo tiene 900 kilómetros de diámetro y fue visto hace más de cien años en 1801.

En todo caso, entre la ciencia ficción y la realidad los tiempos se acortaron de manera significativa. La misión Rosetta hizo realidad los sueños cinematográficos recientes, aunque la verdad sea dicha, la aventura científica desmerece para que Bruce Willis nos muestre que, si otrora fue «duro de matar», en *Armageddon* fue de lo más sencillo: él mismo se lo buscó.

Para la sonda espacial Rosetta los héroes estaban en Europa, no en la glamorosa NASA, pasaron días y noches en una sala llena de computadoras y laboratorios de instrumentación indescifrable. Bebían café todo el tiempo y por lo mismo acudían al sanitario continuamente sin exponer sus vidas como lo hace el hombre de ojos entrecerrados y mirada al infinito. No activan una bomba, en un acto de salvación y sacrificio que es epifanía del espíritu humano.

En ese mismo año estuvo en cartelera la película *Impacto profundo*, que relataba con más cuidado en su realización el mismo drama. Se exhibió en salas de cine dos meses antes que *Armageddon* pero no tuvo el éxito taquillero que sí consiguió el sacrificio que nos dio vida por muchos años más. En *Impacto profundo* el asteroide asesino tiene solo once kilómetros de diámetro. Tiene por eso una gravedad muy débil que es correctamente interpretada en la película. El presidente de los Estados Unidos es afroamericano —lo que ya fue una predicción de la llegada de Obama a la Casa Blanca—. La misión Mesías tiene un nombre bíblico evocador y se realiza en cooperación con Rusia. El encargado de liderar al equipo que viene a salvarnos la vida es Robert Duval, quien también acostumbra a entrecerrar los ojos y mirar al infinito antes de sacrificarse por todos nosotros.

¡Rosetta lo hizo mejor!, y es la gran hazaña fuera de la pantalla. El módulo Philae se posó sobre el cometa Churyumov Gerasimenko, que tiene forma irregular y un tamaño aproximado de cinco kilómetros.

Mientras tanto, en la realidad de nuestros días, Cassini nos sorprendía con imágenes de gran belleza y una reiterada confirmación de las posibilidades de vida incipiente en otros lugares de nuestro sistema solar.

Para no perturbar la posibilidad de vida en alguna de sus lunas, la misión Cassini decidió lanzar la nave hacia el planeta Saturno. Ahí, el robot se desintegró al entrar en contacto con la atmósfera mientras viajaba a cientos de miles de kilómetros por hora. La combustión que se generó por la fricción con los gases acabó por evaporar los restos, evitando de esta manera que se afectase a un posible ecosistema en los satélites de Saturno.

Para los que nacimos en el siglo pasado este breve relato es un ensueño de la infancia. La crónica es propia de una película de ciencia ficción. No hace mucho que esta narración producía fuegos artificiales en la cabeza rebosante de imaginación de los niños. Hoy es noticia de los periódicos.

Gracias a Cassini sabemos ahora que Saturno cuenta con dos lunas que no conocíamos: Metone y Palene. También sabemos que Encelado tiene grandes cantidades de agua y que esta es expulsada a la atmósfera como chorros parecidos a geiseres.

Cassini nos dejó con la misteriosa imagen de un gigantesco hexágono en el polo norte de Saturno. Posiblemente formado por corrientes de aire y turbulencias huracanadas de gas.

La misión Cassini llegó a su fin después de veinte años de haber comenzado. Fue lanzada el 15 de octubre y terminó el 15 de

septiembre. Es sin duda otra de las grandes aventuras de los tiempos que nos ha tocado vivir.

La famosa sentencia popular que dice: «El mundo real es más pequeño que el mundo de la imaginación», es ahora incierta. El mundo que conocemos ha superado con mucho a la imaginación.

Capítulo 21

La gravedad y la literatura

El Principito de Antoine de Saint-Exupéry

Fueron las experiencias de Antoine de Saint-Exupéry en el desierto del Sahara las que lo llevaron a escribir la historia de un príncipe pequeño proveniente de otro planeta.

Un aspecto notable de *El principito* (1943) es que el autor mismo hizo las ilustraciones del libro en acuarela. Se ha sugerido que, en la configuración astronómica que aparece en la portada de la versión original, se puede apreciar un triángulo isósceles formado por Saturno, Júpiter y la estrella Aldebarán. Este arreglo ocurrió en 1940 y se repitió en el año 2000. Como aviador, De Saint-Exupéry tenía conocimientos de astronomía y se ha llegado a plantear la posibilidad de que esta conjunción de astros fuese trazada deliberadamente para conmemorar el centenario de su nacimiento. Antoine de Saint-Exupéry nació con el siglo XX.

Mucho se puede especular con los astros. Podría ser que la portada muestre un rombo en el que Marte y Saturno danzan con la Luna al amanecer. Una de las estrellas dibujadas sería Antares, de la constelación Escorpión. Sin embargo, esta singular configuración, observada en el hemisferio sur quizás hubiera llevado al aviador a dibujar la Luna en una de sus fases. Antares es una estrella roja que rivaliza con Marte en su color y brillo. De hecho, Antares significa «rival de Ares (Marte)». La estrella Antares es grande. Si sustituyera a nuestro Sol, su superficie llegaría hasta la órbita de

Marte y englobaría al cinturón de asteroides. Es por su tamaño y color que sabemos que Antares vive sus últimos días. Pronto, en tan solo un millón de años, estallará en una espectacular supernova para acabar como una estrella de neutrones o como un agujero negro con enorme Fuerza de atracción gravitacional. En cambio, para los adultos, que tomamos todo de manera muy literal, el planeta de donde llegó el Principito es un lugar donde la Fuerza de gravedad es muy débil.

Con la indulgencia que nos conceden los niños a los mayores, diremos que el planeta de donde viene el Principito es un lugar sin atracción... por lo menos no la gravitacional.

Odio tener que decirlo —porque el hacerlo involucra cifras y todos sabemos que el Principito se burla de las cifras— pero siendo un planeta apenas más grande que una casa, la Fuerza de gravedad en él debe ser tan débil que sobre su superficie difícilmente podrían mantenerse objetos en movimiento.

Todos los objetos celestes, ya sean grandes planetas o pequeños asteroides, tienen una velocidad de escape. Esta es la velocidad mínima a la que se deben mover los objetos para liberarse de la atracción gravitacional del lugar que habitan.

En el caso del asteroide B 612, del que proviene el Principito, la velocidad de escape es tan pequeña que el menor movimiento lo despegaría de su superficie para no caer nunca más en él.

Si el asteroide B612 tiene seis metros de radio y una masa de seis mil toneladas entonces caminar por él a una velocidad cien veces menor a la velocidad con que usted camina en la Tierra ya lo

pondría en el límite de salir al espacio. La rosa que el Principito cultiva no tendrá nunca un caracol de jardín porque estos caminan a una velocidad mayor que la necesaria para escapar del planeta. Los caracoles, famosos por la parsimonia de su andar, saldrían del planeta cuando se pusieran en marcha. Solo aquellos que aminoren el paso tendrían más arraigo en tan peculiar astro.

Por supuesto que nadie dijo que el planeta de donde viene el Principito tenga seis mil toneladas de peso. Eso es lo que sería si el planeta, con tan solo seis metros de radio, fuera de fierro y un poco de plomo. Sin embargo, si el asteroide reúne una masa de seis mil millones de toneladas, la Fuerza sobre los objetos en su superficie sería de la misma intensidad que la que ejerce nuestro planeta sobre nosotros.

La velocidad de escape es la necesaria para que un objeto abandone la Tierra o el planeta donde se encuentre. Para nosotros la velocidad de escape es de 11.2 Km/segundo, es decir 40,320 kilómetros por hora. Para tener una referencia diremos que un avión viaja a poco más de mil kilómetros por hora. Se necesitaría que lo hiciera cuarenta veces más rápido para que pudiera abandonar la Tierra.

Esta velocidad no depende de la masa del objeto ni de la dirección en que es lanzado, pero si depende de la masa del planeta donde se encuentra el objeto.

Cuando el objeto adquiere una velocidad superior a la velocidad de escape, éste se alejará indefinidamente de la Tierra. Si la velocidad del objeto es inferior a la velocidad de escape entonces permanecerá ligado en una órbita que gira alrededor del planeta.

Las velocidades de escape de los planetas del sistema solar son:

Mercurio	4.25 Km/segundo
Venus	10.36
Tierra	11.18
Marte	5.02
Júpiter	59.54
Saturno	35.49
Urano	21.29
Neptuno	23.71

La velocidad de escape de cuerpos más pequeños del sistema solar:

Ceres	0.51 Km/segundo
Plutón	1.23
Encelado	0.239
Mimas	0.159
Luna	2.38

Algo más parecido al mundo del Principito es el cometa Churyumov Gerasimenko, objetivo de la misión Rosseta. Para este cuerpo la velocidad de escape es de 0.8 metros por segundo, que equivalen a 3 km/hora. Como referencia considere usted que, en condiciones normales, una persona camina a 4 km/hora. En este cometa debe usted caminar despacio si no quiere salir de su superficie.

El problema con esto es que, siendo un astro tan pequeño con tan solo seis metros de radio, el estar de pie en su superficie implica intensos gradientes en la Fuerza de atracción. Esto significa que el

Principito, con un metro de estatura, sentiría en la cabeza una Fuerza 70 % menor que la que sienten los pies. Si su estatura es de 1.5 metros, entonces sentirá en la cabeza el 60 % de la Fuerza que percibe en los pies. Esa sensación de pies pesados puede interpretarse de manera equivalente como de cabeza ligera.

La velocidad de escape de este planeta inusualmente masivo para su tamaño sería de once metros por segundo, que es del orden de la velocidad de los corredores de cien metros. Un profesional de los cien metros planos lograría salir de ahí con solo correr para impulsarse, pero, los que tengan un entrenamiento menos eficiente no lo lograrían. Al intentarlo quedarían orbitando alrededor del asteroide. La Fuerza de Gravedad sobre su cuerpo actuaría de manera desigual en las partes del cuerpo más cercanas al planeta. Esto provocaría que la trayectoria adquiriese alguna forma caprichosa. Algunos objetos podrían separarse para formar anillos como los de Saturno, pero eso no ocurriría con una persona que solo experimentara el estiramiento de los músculos.

Con esta Fuerza de Gravedad es difícil que se conserve cerca algún gas como el oxígeno para formar una atmósfera. La velocidad media de una molécula de oxígeno a 20 °C de temperatura es de 0.48 kilómetros por segundo, muy por encima de la velocidad necesaria para escapar.

El planeta del Principito debe tener una gran densidad para que la Fuerza de Gravedad sea parecida a la que experimentamos en la Tierra. Eso explica también que el astro sea esférico.

La Luna y la Tierra son redondos porque son grandes. La Fuerza de Gravedad intenta redondear a los objetos al ejercer su acción de manera simétrica. Cuando los objetos son pequeños como asteroides o cometas las Fuerzas internas del material son mayores que la Fuerza de Gravedad sobre la superficie del cuerpo. Por eso conservan su forma irregular.

Sobre nuestro planeta no puede haber montañas mayores a los quince mil metros. En cambio, en Marte, que es un planeta más pequeño que el nuestro, la montaña más grande mide veinticinco mil metros. Esto es gracias a que la Fuerza de Gravedad de Marte es más débil que la de la Tierra.

Además, cuando los planetas se formaron, una buena parte de los materiales estaban calientes y parcialmente maleables, lo que facilitó la formación esférica bajo el efecto de la Fuerza gravitacional. El planeta del Principito es redondo, así apareció en la primera versión y así sigue siendo en los dibujos más recientes. Por tanto, la masa del asteroide está muy concentrada como para poder producir una Fuerza intensa en la superficie.

Sea como sea, vivir en un planeta pequeño tiene también grandes ventajas: «basta correr tu silla algunos pasos y contemplarás el crepúsculo cada vez que lo desees».

No parecería fácil entender la vida del Principito en un planeta con tan poca Fuerza gravitacional. Ha resultado siempre más sencillo abrazar su excéntrica existencia, tal como le ocurrió a Antoine de Saint-Exupéry cuando el 30 de diciembre cayó en el desierto del Sahara por fallas mecánicas en su avión. De ahí que escribiera:

Comprendí poco a poco tu pequeña vida melancólica. No habías tenido en mucho tiempo más distracción que la dulzura de las puestas de sol. Me di cuenta de este nuevo detalle el cuarto día en la mañana, cuando me dijiste:

—Me gustan mucho las puestas de sol. Vamos a ver una.

—Pero hace falta esperar.

—¿Esperar qué?

—Esperar a que el sol se ponga.

H. G. Wells, el primer hombre en la luna y la antigravedad

Poco sabemos del señor Cavor, salvo que era un físico retraído y que probablemente aún vive en la Luna, a donde llegó hace mucho tiempo junto con el empresario Bedford. Nunca estaremos seguros de cómo elaboró la cavorita, pero fue gracias a la nave construida con ella que Cavor consiguió tan insólito distanciamiento. Solo sabemos que mezcló «algunos metales y otras cosas». Con este material fantástico de su invención construyó una nave blindada a la Fuerza gravitacional, y así, con un literal desapego de nuestro planeta, viajó a la Luna.

Muy probablemente Cavor encontró, en nuestro satélite, una opción de vida distinta, de la que ya no quiso salir. Nunca más regresó a la Tierra, o quizá debemos decir: «aún no ha regresado», porque de todo esto hace apenas poco más de cien años. Bien podría ser que el vivir en un lugar donde no existen los agentes que nos enferman y acortan nuestras vidas le haya proporcionado una longevidad inusitada.

Cuando se comunicó por radio desde la Luna para revelar el secreto en la fabricación de la cavorita, la conversación se vio interrumpida, muy probablemente porque la imprudente confesión de Cavor a los selenitas sobre nuestro gusto por la guerra llevó a las criaturas lunares a tomar precauciones impidiendo todo contacto subsecuente.

Es posible usar pantallas de varios tipos para cortar la luz, el calor, la influencia eléctrica del Sol o el calor de la Tierra. Es posible proteger cosas de los rayos de Marconi con placas de metal, pero nada cortará la atracción gravitacional del Sol o de la Tierra. ¿Por qué esto es así? Es difícil saberlo. Cavor no vio por qué esta sustancia no debía existir [...] (Wells, 1901).

El señor Cavor dio con la fórmula y logró producir lo que él mismo llamaría «cavorita». La sustancia descubierta por este gran físico — ahora en el destierro— corta la atracción gravitacional.

Los físicos más convencionales de nuestra era hemos especulado por mucho tiempo sobre la posibilidad de que la antimateria pudiese tener esta propiedad de ingravidez.

En la Organización Europea para la Investigación Nuclear (CERN), se produce antimateria en cantidades suficientes como para poner a prueba sus propiedades gravitacionales. Los átomos hechos de antiprotones y antielectrones podrían comportarse de manera extraña bajo la influencia de la gravedad terrestre, y esto podría ser observado.

Algunas de las preguntas sujetas a la experimentación son: ¿es que los átomos de antihidrógeno caen de la misma manera como

sabemos que caen los átomos de materia, obedeciendo las leyes de la gravedad? O ¿es que la antimateria tiene una masa negativa? Es decir que una manzana de antimateria, al madurar en el antiárbol, ¿caerá no al suelo, como ocurre con la materia, sino hacia lo alto?

Para estudiar esto se construyó un nuevo experimento llamado Antihydrogen Experiment: Gravity, Interferometry, Spectrometry, cuyas siglas (AEGIS) evocan al escudo de Zeus: cuando estamos bajo su «égida», la benevolencia divina nos cubre con la Fuerza del Olimpo. En este proyecto se podría encontrar el blasón que nos ampare de la gravedad que nos atrapa, nos tumba a cada paso y nos mantiene con los pies en la tierra.

Durante 2013 el CERN montó un decelerador, que es lo contrario de un acelerador de partículas. El ELENA (Extra-Low ENergy Antiproton ring) reemplaza al anterior AD (Antiproton Decelerator). El nuevo decelerador ha incrementado el número de átomos de antimateria que pueden ser producidos y estudiados en los experimentos como AEGIS. Este nuevo reductor tiene una circunferencia de treinta metros de perímetro y lleva a los antiprotones de 5.3 megaelectronvoltios (MeV), que son muchos, a una energía de solo cien kiloelectronvoltios (keV).

No nos detendremos en las unidades de uso común para los físicos, sino en el hecho relevante de que tal ralentización de los protones permitirá tener más antimateria a la mano.

Anteriormente el 99.9 % de los antiprotones que proporcionaba el AD se perdían por el repetido uso de hojas delgadas que se utilizaban para decelerar al haz hasta que tuviesen la energía

necesaria para atraparlos. El ELENA incrementa la eficiencia en un factor de diez a cien, además de dar espacio en la sala para el nuevo experimento AEGIS. Este ha comenzado a tomar datos y pronto tendrá la primera medición del efecto de la gravedad sobre la antimateria.

Para resolver el enigma del comportamiento gravitacional de la antimateria, los físicos tratan de entender las diferencias entre los átomos y los antiátomos. Para esto es necesario producirlos, capturarlos y mantenerlos por un buen tiempo con el fin de analizarlos. Siendo antagónicas, las partículas y las antipartículas se aniquilan transformándose en luz y es por eso que en un mundo de materia resulta difícil la conservación de la antimateria.

El hidrógeno es el átomo más simple de materia, está compuesto de un protón y un electrón. El antihidrógeno es el más simple de los átomos de antimateria; está compuesto de un antiprotón y un antielectrón, también llamado positrón.

En 1995 se obtuvieron los primeros antiátomos de hidrógeno en el CERN. La técnica para producirlos era poco eficiente, pues consistía en bombardear con antiprotones a los átomos pesados y esperar a que brotaran pares de electrón-positrón para que luego uno de estos positrones se asociara a un antiprotón. Luego se debía esperar a que estos antihidrógenos viviesen cuarenta millonésimas de segundo para que recorrieran algunos metros a una velocidad cercana a la de la luz antes de aniquilarse.

La colaboración ALPHA (Anti-hydrogen Laser PHysics Apparatus) que construyó otro de los experimentos en esta línea de

investigación, fue la primera en publicar resultados en 2010. ALPHA logró moderar a treinta mil antiprotones fabricados por el decelerador AD. Con el uso de fuentes radiactivas se crearon positrones que fueron mezclados para formar antiátomos. Estos, como los átomos, son también neutros y es por eso difícil de atraparlos con el uso de campos electromagnéticos. Sin embargo, se puede hacer buen uso del momento magnético de los antiátomos para dirigirlos y conservarlos por un instante. De esta manera se consiguió atrapar 38 antiátomos por 172 milisegundos.

En 2011, ALPHA anunció que había conseguido atrapar 309 antiátomos de antihidrógeno y que los había conservado por mil segundos, es decir, diecisiete minutos. Nunca antes se había podido conservar a la antimateria por tanto tiempo.

El último mensaje que Cavor envió a la Tierra fue. «La cavorita se hace de esta manera: tómesese...». El mensaje se vio interrumpido y luego solo se escuchó una palabra sin sentido: «inil». Eso fue todo.

Esta última palabra, incompleta como fue pronunciada, dio origen a múltiples especulaciones. Se conjeturó que Cavor quiso decir «inútil» cuando su final quedó decidido por aquellos seres extraterrestres.

No lo sabemos, pero quizá pronto tendremos la receta para la fabricación de cavorita.

Capítulo 22

La gravedad y la filosofía

A partir de la Teoría de la Relatividad General hemos aprendido mucho de la naturaleza del tiempo y a partir de esto se han desarrollado corrientes filosóficas que plantean nuevas maneras de entenderlo. Intuitivamente pensamos que el tiempo fluye y que todos los procesos se desenvuelven en él como una secuencia que conserva la dirección siempre fija hacia al futuro. Sin embargo, la geometría del espacio-tiempo que nos da la Teoría de la Relatividad General nos muestra que el tiempo no fluye, está ahí con su pasado y su futuro.

Hemos aprendido a medir el tiempo como nunca lo hubiésemos imaginado. El récord de periodos cortos medidos con instrumentación pertenece a los físicos especialistas en óptica y luz láser, quienes han podido controlar el tiempo hasta los doce attosegundos (un attosegundo es la trillonésima parte de un segundo).

Si además de instrumentación hacemos uso de cálculos, entonces son los físicos de partículas elementales los que han podido medir el instante más breve en la naturaleza. El bosón Z^0 es una partícula muy pesada que durante su instantánea vida viajando a una velocidad cercana a la de la luz, no alcanza a recorrer el diámetro de un átomo. Esta partícula vive tan solo dos décimas de yoctosegundo, y un yoctosegundo es 1×10^{-24} segundos. Es decir, el

llamado Zeta-Cero vive dos décimas partes de una cuatrillonésima de segundo. Este es el tiempo medido más corto que tenemos.

También podemos medir tiempos muy largos. Hoy sabemos que nuestro sistema solar se formó con los restos que dejó la explosión de una estrella hace seis mil seiscientos millones de años. Esto lo hemos podido cronometrar comparando las abundancias de los distintos isotopos de uranio. Más aún, al mirar a las galaxias que se alejan de nosotros hemos podido inferir que la edad del Universo es de trece mil ochocientos millones de años.

La vida del Universo es muy breve para lo que podemos medir en grandes escalas de tiempo. Hemos podido determinar la vida media de elementos que decaen en cuatrillones de años.

No tenemos más prefijos para nombrar la magnitud de los intervalos de tiempo gigantescos, como los que usamos al momento de poner el límite en el tiempo que vive un protón si pensamos que este decae.

La ciencia moderna ha logrado conceptualizar intervalos de tiempo que van de los yoctosegundos a los miles de millones de quintillones, que se ubican mucho más allá de los yotta-segundos.²⁵

En la determinación de tiempos de gran escala hemos llegado tan lejos que su inimaginable magnitud tendrá más sentido en nuevas teorías de la física que vengan a describir lo que ahora es insospechado.

²⁵ Es el prefijo del Sistema Internacional que se usa para denotar un cuatrillón, es decir: 10^{24} (uno seguido de veinticuatro ceros).

Sin embargo, a pesar de la destreza que hemos logrado al medir el tiempo, su naturaleza sigue siendo un misterio.

Acostumbramos a mirar al tiempo como un ordenamiento de los eventos del pasado al futuro, pero la física que describe la Teoría de la Relatividad General cuestiona esta manera cotidiana de imaginarlo. El tiempo no es algo independiente de los eventos y pensar que estos ocurren en secuencia, como si el tiempo fuera un recipiente que los contiene, ya no es más aceptado. En la Teoría de Relatividad pensamos que el espacio y el tiempo están íntimamente ligados y que ambos se pueden distorsionar como si fueran plastilina.

Una idea muy antigua que reaparece cada vez que, por una u otra razón, nos percatamos de la fugacidad que hay en todo lo que nos rodea, es la que establece la reconfortante frase: «El paso del tiempo es solo una ilusión».

Ya antes de Sócrates los filósofos se plantearon esto mismo. Parménides sugería que no existe el cambio y aunque esto puede parecer chocante es posible que esta visión de la naturaleza sea correcta.

Hoy la antigua concepción del tiempo como espejismo ha sido incorporada a la física moderna en uno de sus aspectos más fundamentales que también acaba por decirnos mucho de lo que somos.

El Universo esta hecho de todos los momentos: del pasado, presente y futuro. Ya todo está ahí. El Universo es todos los instantes y no solo el momento breve que se nos escapa con sigilo. El pasado no se

ha ido porque es parte del tiempo y del espacio que forman la estructura del Universo. La historia y el porvenir son parte del «bloque de tiempo», aunque nosotros solo podemos percibir aquello a lo que llamamos presente. El Universo es pues todo el espacio y todo el tiempo.

Esta manera de ver las cosas es conocida como «eternalismo» y se inspira en la Teoría de Relatividad donde se describe al Universo como dotado de cuatro dimensiones que incluyen el espacio y el tiempo. En la manera común de pensar la realidad solo tiene tres dimensiones espaciales que están sujetas al paso del tiempo. El presente no es toda la realidad, el futuro y el pasado también la conforman.

De acuerdo con la corriente eternalista uno podría ir al pasado o visitar el futuro de la misma manera como se camina por la calle. Trasladarse en el espacio es equivalente a viajar por el tiempo, aunque no hemos aprendido los aspectos técnicos para hacer esto último.

No sabemos de la existencia de una quinta dimensión, pero en caso de que la tengamos uno podría pensar en salir por la vía extra dimensional sustrayéndose de las otras cuatro dimensiones. ¿Quizá desde ahí podríamos ver el pasado y el futuro como vemos desde lo alto de un edificio el horizonte formado por dos dimensiones espaciales que se extienden a nuestros pies?

Los filósofos eternalistas consideran que, desde el punto de vista ontológico, el presente no es privilegiado y algunos toman preferencia por aquellas teorías físicas sin tiempo. Julian Barbour,

autor del libro *The End of Time* (Barbour, 1999), va más allá y niega por completo la existencia del tiempo. Considera que la única evidencia que tenemos del pasado es la memoria y la única evidencia del futuro es nuestra fe en que ocurrirá. El extremo de negar el tiempo va más allá de lo que la Teoría de la Relatividad General propone como un Universo en bloque, donde el tiempo es parte de su estructura.

Por supuesto hay físicos que piensan diferente, como Lee Smolin (2013), que argumenta que el tiempo no solo existe, además fluye y es diferente del espacio. Smolin introduce la hipótesis de que las leyes mismas de la física están cambiando.

Para mí el punto más débil de la concepción eternalista es que se deriva de la Teoría de la Relatividad General y no debemos olvidar que esta no se aplica a todo el Universo. No es la teoría que describe al mundo microscópico donde actúan tres de las interacciones fundamentales que conocemos, y donde, por cierto, una de ellas tiene problemas con el tiempo.

Hay muchas ideas, aunque unas son más aceptadas que otras por el éxito que han alcanzado al ser incorporadas en algún marco conceptual. No obstante, en el mundo del conocimiento científico nada es para siempre, las concepciones cambian, aunque Parménides opine lo contrario.

Hay también estudiosos del cerebro que buscan entre las neuronas el origen de la conciencia, con la esperanza de que al encontrarla se entenderá por fin la manera como concebimos el tiempo.

Un año es el tiempo que le toma a nuestro planeta dar la vuelta al Sol. Este juego de los astros tiene una duración de 526,000 minutos. De acuerdo con la Teoría de la Relatividad General todo lo que pasa durante la ejecución de esta danza celestial queda en el recuerdo y en la trama de espacio y tiempo que conforma nuestra existencia. Lo que ocurrirá en el futuro también está ahí, aunque nosotros tendremos siempre la impresión de estar eligiendo lo que determinará nuestras vidas. Pensaremos que hacemos camino al andar sin saber que el camino está hecho y que el porvenir esta ya moldeado para delinear todo lo que somos.

Capítulo 23

La gravedad y el fin del universo

Algunos creen que todo acabará en el fuego que calcina, otros piensan que el gran ocaso será glacial y que nuestro mundo terminará en el frío de la más profunda oscuridad.

¿Cuál es el destino final del Universo? La respuesta está escrita en las estrellas que curvan el espacio esculpiendo su futuro.

En diciembre de 2011, Brian Schmidt, Adam Riess y Saul Perlmutter recibieron el Premio Nobel de Física por la coordinación de los proyectos que lograron descifrar el código estelar que llega hasta nosotros desde las más lejanas galaxias.

Durante muchos años, grandes equipos de científicos estudiaron decenas de estrellas en plena explosión, a las que se conoce como supernovas. Así descubrieron que la conocida expansión del Universo se está acelerando, es decir, que el Universo no solo crece, sino que lo hace cada vez a una mayor velocidad.

El «Proyecto Cosmológico de Supernovas» inició en 1988, mientras que su competidor, el «Equipo de búsqueda de supernovas de alto corrimiento al rojo» (High Z Supernova), dio inicio en 1994. Los dos equipos compitieron por hacer un mapa del Universo con la detección de supernovas muy distantes.

Antes que ellos, el proyecto Calán Tololo en Chile había descubierto veintinueve supernovas. El proyecto sudamericano había encontrado la manera de medir las distancias a las que se encuentran. El grupo de astrónomos chilenos estableció las

herramientas clave para mediciones muy precisas y sentó las bases del Premio Nobel de 2011. Eso fue reconocido por la Academia de Ciencias de Suecia en su documento sobre las «Bases Científicas del Premio Nobel de Física 2011».

El objetivo de todos estos proyectos era revelar nuestro destino cósmico detectando algo que nos indicara una disminución de la velocidad con que el Universo se expande. Sin embargo, lo que descubrieron fue lo opuesto, es decir que la dilatación del Universo se acelera, la expansión es cada vez mayor y el espacio-tiempo crece y continuará creciendo por siempre.

Una supernova es la explosión de una estrella al final de su vida. Esta puede durar unas semanas y durante este tiempo puede llegar a ser aún más brillante que la Galaxia misma. La luz de las supernovas es útil para determinar la distancia a la que se encuentran, cuanto más débil su brillo más alejada la Galaxia que las alberga. Pero detectar supernovas distantes no es sencillo. En una Galaxia típica solo hay unas cuantas explosiones de este tipo cada mil años. Es necesario tomar imágenes sucesivas en una gran parte del cielo con intervalos de semanas para luego compararlas. Se trata de descubrir en las fotos algún punto luminoso que no estaba antes.

Al observar el movimiento de las estrellas en explosión nos hemos percatado de que todo lo que vemos a nuestro derredor terminará en el gélido estertor de las tinieblas. La luz morirá lentamente como muere el sonido de una nota musical que se diluye en la vastedad de nuestra atmósfera.

Estos proyectos de astrofísica han mostrado que la profundidad de la mirada científica no siempre es una metáfora. Nada más real que la profusa contemplación del firmamento, que nos ha llevado a explorar objetos situados a ocho mil millones de años luz.

El Universo comenzó a expandirse con la Gran Explosión. Ese agrandamiento es más lento de lo que podría ser por el efecto de la atracción gravitacional que la masa de la materia contenida ejerce sobre él. Sin embargo, hace aproximadamente cinco mil millones de años la energía oscura comenzó a dominar sobre la materia oscura y esta expansión comenzó a acelerarse.

Por otra parte, los cosmólogos aún no tienen una idea clara sobre la naturaleza de nuestro Universo. Según ellos, dependiendo del valor que tome la constante cosmológica, el Universo será abierto o cerrado.

El futuro de un Universo cerrado es el fuego. Un Universo así está destinado al colapso. Esto significa que después de un tiempo que podría ser de trece mil millones de años, las galaxias se fundirán, el cielo estará más caliente que las estrellas y todo hervirá para convertirse nuevamente en un punto luminoso sumergido en la nada. En estas circunstancias, la luz morirá con un destello final que desaparecerá súbitamente.

En cambio, el futuro de un Universo abierto no es la inmortalidad sino la muerte lenta.

Esta posibilidad de Universo abierto es la que favorecen las observaciones de los astrónomos. Después de cien mil millones de años todas las estrellas habrán desaparecido y solo quedará un

débil resplandor que se apagará en la eternidad de un espacio sin fin.

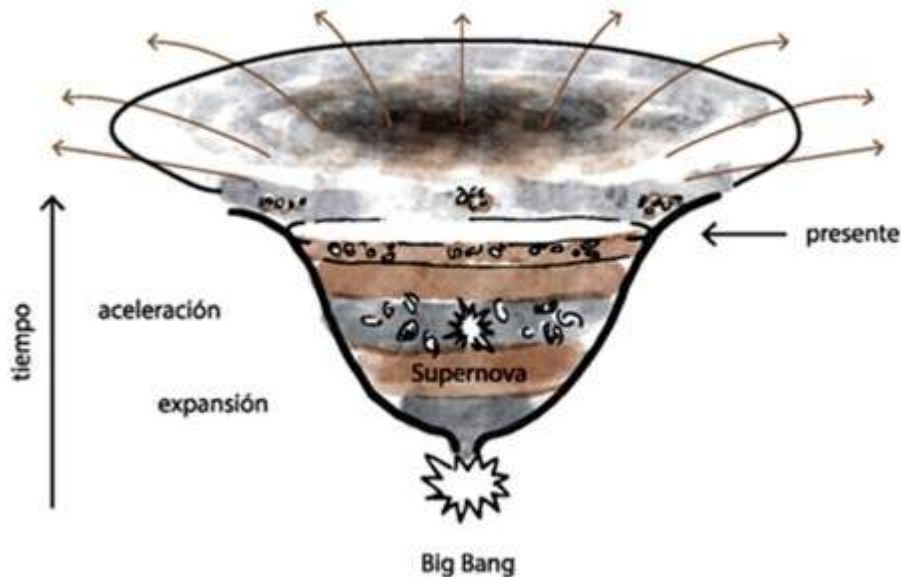
La energía oscura actualmente constituye un 70 % de toda la energía presente en el Universo, el resto está formado por un 26 % de materia oscura, que no sabemos qué es, y un 4 % de materia ordinaria de la que están hechos los planetas, las galaxias y todos los objetos que observamos en el cielo.

Algunos cosmólogos han llamado a esta energía oscura «quintaesencia» que es un término que se utilizaba en la Edad Media para designar a un quinto elemento adicional a los cuatro conocidos: tierra, agua, fuego y aire. Un quinto elemento o quintaesencia debía formar parte del todo.

Las observaciones astronómicas mostraron en 1998 que el Universo crece en forma excesiva, pero la naturaleza de la energía oscura que impulsa la dilatación podría implicar escenarios distintos para el futuro del Universo. Aún tenemos que entender cuál es la naturaleza de esta quintaesencia.

En el escenario posible de un Universo acelerado, este no solo se expandirá por siempre, lo hará de manera desgarradora. Las incontables generaciones de estrellas que hoy pueblan el firmamento se irán apagando una tras otra. Los gases intergalácticos se esparcirán tanto que no será más posible la formación de nuevas estrellas. Los planetas del sistema solar se alejarán y aun las moléculas y los átomos se separarán en sus componentes más elementales. Las partículas que forman todo lo

que nos rodea se hallarán más y más alejadas unas de otras en una oscuridad profunda, silenciosa y fría.



La expansión del Universo comenzó a acelerarse hace cinco mil millones de años. Las observaciones de supernovas lejanas indican que el Universo continuará creciendo por toda la eternidad mientras la luz se extingue lentamente.

No estaremos ahí para contemplarlo porque nuestro fin habrá llegado mucho antes. Para la Tierra el desenlace será brillante. Dentro de mil millones de años sus habitantes verán como el Sol crece. Ya envueltos en su luz, el calor terminará por evaporar los mares. El Sol crecerá aún más cuando ya no esté nadie. Dentro de cinco mil millones de años será tan grande que absorberá a nuestro planeta. Así, bañado en la luz de su propia estrella, se extinguirá la memoria de nuestro planeta que alguna vez vio surgir la vida.

Capítulo 24

La mirada profunda

Los experimentos continúan observando atentos la llegada de más ondas gravitacionales desde el espacio. En fechas recientes se publicó el catálogo completo de lo que hasta ahora ha sido detectado. Este incluye diez eventos en los que la fuente de la perturbación del espacio y del tiempo fue la fusión de agujeros negros y uno en el que la onda gravitacional fue provocada por la colisión de dos estrellas de neutrones.

De los diez eventos registrados en el mapa de fuentes gravitacionales, cuatro fueron reportados por primera vez en 2019 y entre estos se incluye al más distante choque entre agujeros negros, que a su vez involucra a los más masivos entre los que han sido medidos. La onda gravitacional provocada por estos portentos de la naturaleza llegó a nuestro planeta el 29 de julio de 2017, pero la coalescencia de los agujeros negros que la provocó tuvo lugar hace cinco mil millones de años, cuando nuestro sistema solar se estaba formando. Los objetos eran tan grandes que liberaron el equivalente a cinco masas solares en radiación gravitacional que deformó el espacio-tiempo.

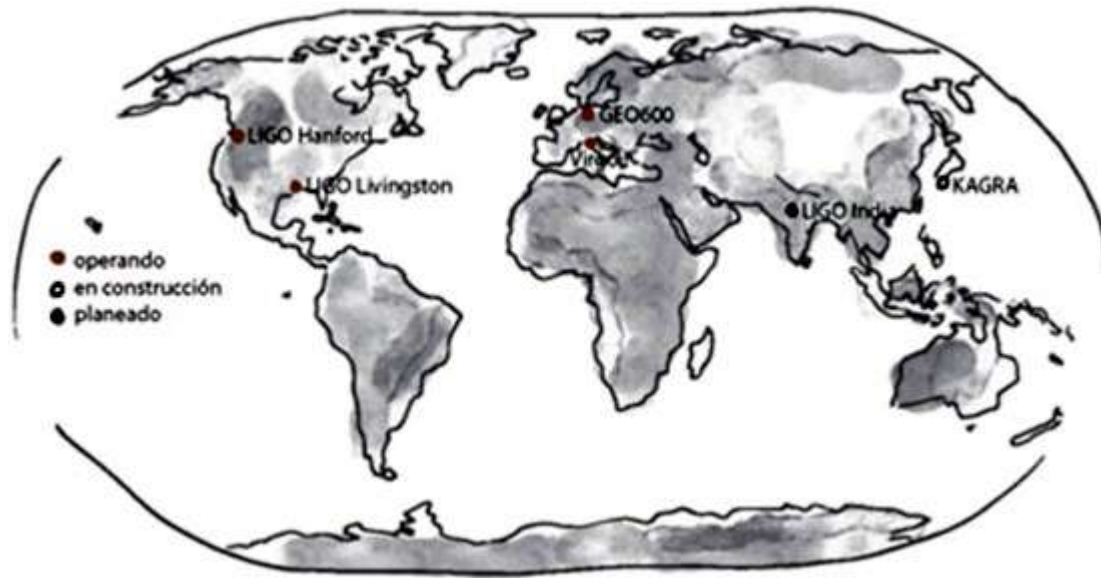
LIGO no es el único experimento de detección de ondas gravitacionales que existe, aunque si es el más grande. A lo largo de este libro hemos mencionado a la colaboración VIRGO, que construyó un detector cerca de Pisa, Italia con el esfuerzo conjunto de Francia e Italia. El detector es una escuadra parecida a LIGO,

pero los brazos tienen tres kilómetros de largo. Comenzó operaciones en 2007 y ahora detecta de manera conjunta algunos de los eventos de LIGO. La colaboración está formada por más de doscientos cincuenta físicos e ingenieros de diecinueve grupos europeos de investigación.

En Alemania está el detector GEO600 que fue construido en colaboración de grupos alemanes e ingleses. Los brazos tienen una longitud de seiscientos metros y se encuentra al sur de Hannover, en el norte de Alemania. En este experimento se probaron varias de las tecnologías que ahora son usadas en LIGO. Además de estos detectores se planean y construyen otros:

KAGRA (por sus siglas: Kamioka Gravitational Wave Detector) es un experimento japonés en construcción. Los brazos tendrán una longitud de tres kilómetros y estará colocado bajo tierra en la mina de Kamioka. Comenzará a tomar datos en 2019.

LIGO India es el nombre de la iniciativa hindú que construye una tercera estación de LIGO con un costo de trescientos cincuenta millones de dólares. Deberá entrar en funcionamiento en 2023.



Red global de observatorios operando y en construcción. Tomado del sitio oficial de la colaboración LIGO (Chu, 2017).

En 2034 entrará en funcionamiento el más grande telescopio de ondas gravitacionales. El experimento LISA (Laser Interferometer Space Antenna) pretende tener tres satélites separados por una gran distancia, que estarán en contacto a través de un haz de luz láser para percibir la llegada de ondas gravitacionales (Spanner, 2016). El primero de los tres satélites ya está en órbita. La Agencia Espacial Europea logró colocar al primero de los satélites en posición. Se encuentra a 1.5 millones de kilómetros de nuestro planeta en dirección del Sol en un punto donde las Fuerzas de gravedad del Sol, y de la Tierra se anulan mutuamente. En el satélite se encuentran dos cámaras que flotan dentro de la nave en permanente caída libre.

El plan del proyecto LISA consiste en tres naves similares para formar un triángulo con cinco millones de kilómetros por lado. Los instrumentos en los tres satélites les permitirán rastrearse entre sí para medir sus distancias con exactitud de décimas del tamaño de un protón. Con este arreglo se podrá detectar con una gran precisión la llegada de ondas gravitacionales provenientes de los confines del Universo.

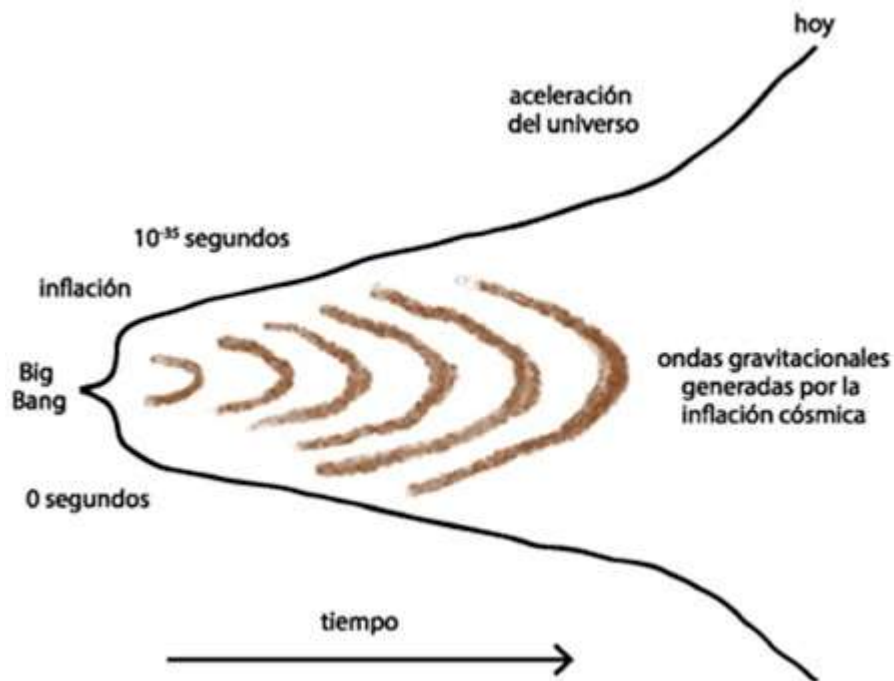
A los participantes de este proyecto les gusta decir: «El tamaño y la precisión de LISA esta fuera de este mundo».

Este detector espacial nos dará una imagen que no proviene de las ondas electromagnéticas ni de partículas ultraenergéticas sino de las perturbaciones del espacio-tiempo que recién han sido detectadas. Con esto vendrá un auge en la astronomía de ondas gravitacionales que nos promete una mirada muy profunda al Universo.

Podremos ver la colisión de agujeros negros con una masa de hasta una decena de millones la del Sol. Cuerpos que nacieron cuando el Universo tenía apenas trescientos millones de años. Un telescopio como LISA nos permitirá escudriñar la época en que se formaron las galaxias.

Actualmente no contamos con los detalles de cómo ocurrió el Big Bang. Los cálculos son vagos porque no tenemos una teoría satisfactoria del proceso. Lo que sí parece ser cierto es que se trata del fenómeno más violento de nuestra historia. La frecuencia de las ondas gravitacionales emitidas entonces debe cubrir un amplio

espectro de frecuencias y el detector LISA podría llegar a tener la sensibilidad para verlas.



El Universo comenzó hace trece mil ochocientos millones de años y en la etapa violenta de la inflación cósmica debieron generarse ondas gravitacionales.

Ya en 2014 un observatorio con base en la Antártida anunció haber observado de manera indirecta la existencia de tales perturbaciones. El experimento BICEP (por sus siglas en inglés: Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization) escudriña una región del cielo en el Polo Sur y por un momento creyó tener evidencia indirecta de las ondas que se generaron durante la inflación cósmica.

Actualmente pensamos que cuando apenas habían pasado 10^{-35} segundos después del Big Bang, el Universo creció súbitamente. Como hemos visto, esta fase conocida como inflación cósmica se considera crucial en la estabilización del Universo. El cambio violento del espacio-tiempo debió producir ondas gravitacionales que afectaron a la luz que se generó en una etapa posterior y que conocemos hoy como radiación cósmica de fondo.

El experimento BICEP mide la polarización de esta luz y encontró que esta coincidía con la que se produce por interferencia con las ondas gravitacionales que provienen de la etapa inflacionaria. Sin embargo, la colaboración se retractó al poco tiempo, cuando encontró que el efecto observado no era auténtico sino generado por el polvo intergaláctico.

La astronomía de ondas gravitacionales tiene un futuro prometedor. La posible detección de ondas gravitatorias primordiales podría ofrecer información del origen mismo del Universo.

Por otro lado, la detección de ondas en procesos extremos nos puede indicar hasta donde la Teoría de la Relatividad General es válida. Todavía no sabemos si es aplicable en todo el Universo o si hay una frontera para su validez. Resultará muy interesante ver cómo se comporta el espacio-tiempo cuando la curvatura alcanza valores límite. Quizá nos dirá algo sobre la materia en condiciones extremas de presión y densidad.

La naturaleza misma de las ondas gravitacionales es objeto de estudio. Según la Teoría de la Relatividad General existen dos posibles estados de polarización para estas, y existen variantes de la

teoría en que las ondulaciones pueden tener otros estados de polarización, de manera que la medición puede dar indicio de variantes en el marco conceptual.

No sabemos lo que nos espera de una astronomía de este tipo. ¿Quizá podremos ver el origen mismo del Universo? Lo que las ondas gravitacionales nos pueden dar es la mirada más profunda de cuantas miradas existen. La que se hunde en el tiempo y en el espacio para revelarnos el instante mismo en el que todo comienza.

Epílogo

Más allá del gran descubrimiento de ondas gravitacionales y agujeros negros estamos presenciando el nacimiento de una nueva astrofísica, la de las ondas gravitacionales.

¿Qué nuevos paisajes se revelarán ante nuestros ojos con esta nueva visión? No lo sabemos. Tampoco sabíamos lo que encontraríamos en la vastedad del Universo cuando Galileo miró por primera vez con un telescopio. En 1609, con un modesto arreglo de lentes —una convexa adelante y una cóncava en el ocular, incrustados en el tubo de un órgano—, el italiano puso los primeros ojos en el espacio. Lo que observó dejó en entredicho lo proclamado siglos antes por Aristóteles sobre la perfección del mundo celeste. Fue así, con una sola mirada, como se destruyó la tesis tradicional de la esfericidad perfecta.

Después los rayos X nos abrieron la mirada al interior de las cosas. Luego otras formas de radiación ampliaron el alcance de nuestros ojos para explorar la intimidad de la materia. Pero en todos esos años nunca pensamos que un día el espacio y el tiempo nos darían la posibilidad de ver. Nunca imaginamos que un día usaríamos el tiempo que transcurre y el espacio que nos alberga para descifrar la noche.

Esta nueva manera de atisbar el Universo nos permitirá sondear en las tinieblas del cielo más alto.

Hoy pensamos que ningún cuerpo se mueve fuera del espacio ni del tiempo. Nos sabemos ligados a esa estructura que nos da existencia.

Estamos vinculados al espacio y al tiempo de la misma manera como estamos enlazados con nuestro destino. Tal vez por fin acabaremos entendiendo que espacio, tiempo y destino son la misma cosa y tal vez nos demos cuenta de que solo somos la expectativa del futuro y la memoria del pasado.

Es cierto, solo vivimos para entrar y salir de nuevo, pero esta vez hemos aprendido que ese espacio-tiempo que nos ata es también una promesa visual. Esa estructura ineludible del Universo nos ofrece una mirada. Podría ser la mirada definitiva, la que nos permita transcribir la oscuridad sin cuerpo; la mirada geométrica, la mirada profunda al Universo.

Glosario biográfico

- Antoine de Saint-Exupéry (1900-1944), escritor francés cuya obra más conocida es la novela corta *El principito*, que es el libro escrito en francés más leído y más traducido.
- Alfonso Cuarón (1961), director, guionista y productor de cine. Ganó el Oscar como mejor director en 2014 por la película *Gravedad* y en 2019 por *Roma*.
- Abhay Ashtekar (1949), físico indio radicado en Estados Unidos. Es uno de los proponentes de la Teoría de Gravedad Cuántica de Lazos, que mezcla la Teoría de la Relatividad General con la Mecánica Cuántica. La Teoría cuántica de lazos compite con la Teoría de Cuerdas en la aspiración por convertirse en una teoría del todo.
- Aristóteles (384-322 a. e. c.), filósofo griego que abordó una gran cantidad de temas y fundó áreas de conocimiento con sus numerosos escritos. Es considerado el pensador más influyente en la historia de Occidente.
- Albert Einstein (1879-1955), físico alemán que asumió las nacionalidades suiza, austriaca y estadounidense. Es el científico más popular de nuestra época y uno de los creadores de la Teoría de la Relatividad General. Ganador del Premio Nobel de Física de 1921 por su interpretación del efecto fotoeléctrico.

- Adam Riess (1969), premio Nobel de Física en el año 2011 por los trabajos que mostraron que el Universo parece acelerar su expansión.
- Barry Barish (1936), físico norteamericano, hijo de inmigrantes judíos de origen polaco. Hizo su carrera en la física experimental de altas energías participando en experimentos en Fermilab y la colaboración MACRO en Italia. Se incorporó al proyecto LIGO y llevó el proyecto a buen puerto. El comité Nobel decidió dividir el Premio Nobel de Física 2017 en una mitad para Rainer Weiss y la otra mitad para él y Kip Thorne.
- Brian Schmidt (1967), astrofísico norteamericano que compartió en 2011 el Premio Nobel de Física por sus trabajos que mostraron evidencia de una expansión acelerada del Universo.
- Christopher Nolan (1970), director de cine británico que ha sido nominado en varias ocasiones al premio Oscar de la Academia de cine estadounidense.
- Demócrito de Abdera (460-370 a. e. c.), filósofo griego conocido como el «filósofo sonriente». Es recordado de manera especial como representante del atomismo. Por su manera de ver la naturaleza se lo considera también el padre de la ciencia moderna.
- Emmanuel Lubeski (1964), fotógrafo mexicano que ha recibido reconocimientos por su participación en el cine. Ha recibido tres premios Oscar de la Academia de cine estadounidense.

- Emmy Nöther (1882-1935), matemática alemana de origen judío considerada por muchos como la más importante en la historia de la matemática. En la física moderna descubrió la relación que hay entre la simetría y la conservación de ciertas cantidades.
- Galileo Galilei (1564-1642), físico italiano que contribuyó de manera importante en muchas áreas del conocimiento. De particular importancia es su ruptura con el sistema aristotélico de pensamiento y su conflicto con la iglesia católica.
- George Gamow (1904-1968), físico ruso nacionalizado norteamericano. Contribuyó en el entendimiento de la formación de los elementos químicos y la Teoría del Big Bang. Propuso una forma de entender la manera como el Acido Desoxirribonucleico controla la síntesis de proteínas. Aunque la idea no fue correcta ayudó a otros en la resolución del problema.
- Hermann Minkowski (1864-1909), matemático alemán nacido en Rusia que propuso una geometría nueva de cuatro dimensiones, en la que se incluía al tiempo además de las coordenadas espaciales. Es famoso su pronunciamiento en una conferencia: «El espacio y el tiempo por separado están destinados a desvanecerse en las sombras. Solo la unión de ambos puede representar la realidad».

- H. G. Wells (1866-1946), escritor británico considerado por muchos como el padre de la ciencia ficción junto con Julio Verne.
- Hendrik Lorentz (1853-1928), físico holandés ganador del Premio Nobel de Física en 1902. Describió la contracción que sufren los cuerpos que viajan a grandes velocidades formulando así las bases de lo que sería la Teoría de la Relatividad Especial.
- Henrie Poincaré (1854-1912), matemático, físico y filósofo de la ciencia de nacionalidad francesa. Es uno de los artífices de la Teoría de la Relatividad Especial que hoy se atribuye a Albert Einstein.
- Isaac Newton (1642-1727), físico inglés que descubrió la Ley de la Gravitación Universal, las bases de la mecánica clásica en tres leyes que llevan su nombre, la naturaleza de la luz y el desarrollo de lo que hoy conocemos como cálculo diferencial. Hizo importantes aportaciones en la matemática y la mecánica de fluidos.
- Joseph Weber (1919-2000), físico norteamericano pionero en la búsqueda de ondas gravitacionales. Construyó los primeros detectores para medir los cambios en el espacio-tiempo que según la Teoría de la Relatividad General debían existir.
- Joseph Hooton Taylor (1941), físico norteamericano ganador del Premio Nobel de Física en 1993 junto con su estudiante

Russell Hulse, por el descubrimiento de un objeto astronómico que emite pulsos de radiación y al que se llamó púlsar.

- John Couch Adams (1819-1892), astrónomo inglés conocido por los cálculos que previeron la existencia del planeta Neptuno.
- Juan Maldacena (1968), físico argentino que ha contribuido a la teoría de supercuerdas. La conjetura matemática que lleva su nombre establece una equivalencia entre algunas teorías de la gravedad cuántica y una teoría de campos. Esta correspondencia ha revolucionado la Teoría de Cuerdas, llevándola a ser el mejor candidato de lo que podría ser una teoría de todo.
- Lee Smolin (1955), físico norteamericano que ha contribuido al desarrollo de las teorías cuánticas de la gravedad y que ha incursionado con ideas en biología teórica, filosofía y teoría política.
- Max Planck (1858-1947), físico alemán fundador de la mecánica cuántica y reconocido con el Premio Nobel de Física en 1918. Explicó cómo un cuerpo negro emite radiación a través de la cuantización de la energía, es decir, de la hipótesis, después corroborada, de que la energía está dada en cantidades discretas.
- Michael Faraday (1791-1867), físico británico estudioso del electromagnetismo. Estableció la relación entre la electricidad y el magnetismo. En química descubrió el Benceno, molécula

con seis carbonos y seis hidrógenos que es ampliamente usado en la química aplicada. La ley de Faraday establece que un cambio en la corriente eléctrica de una bobina induce un campo magnético.

- Kip Thorne (1940), físico norteamericano que desarrolló los cálculos de los eventos que actualmente mide el experimento LIGO. Fundó la colaboración LIGO en 1984 y aportó algoritmos de análisis de los datos. El comité Nobel decidió dividir el Premio Nobel de Física 2017 en una mitad para Rainer Weiss y la otra mitad para Barry Barish y él.
- Oskar Klein (1894,1977), físico sueco y uno de los inventores de dimensiones más allá de las conocidas que podrían estar enrolladas a escalas muy pequeñas e imperceptibles.
- Rainer Weiss (1932) nació en Alemania, pero siendo aún niño tuvo que huir con su familia del gobierno nazi. Se trasladó a Checoslovaquia en 1932 y luego a los Estados Unidos en 1938. Su contribución a LIGO fue la invención de la técnica de interferometría láser con la que opera el detector que hizo posible el descubrimiento de las ondas gravitacionales. El comité Nobel decidió dividir el premio Nobel de Física 2017 en una mitad para él y la otra mitad para Barry Barish y Kip Thorne.
- Ronald Drever (1931-2017), sin duda uno de los nombres significativos alrededor del descubrimiento de las ondas gravitacionales. Cuando se anunció el descubrimiento se

encontraba internado en un centro de atención a personas mayores con problemas de demencia. No fue testigo de los resultados de su gran trabajo. Murió en marzo de 2017 y más tarde ese mismo año se anunció el Premio Nobel para Rainer Weiss, Barry Barish y Kip Thorne «por sus decisivas contribuciones al detector LIGO y a la observación de las ondas gravitacionales». Ronald Drever hizo carrera en el diseño de experimentos para poner a prueba los fundamentos de la Teoría de la Relatividad General. Proporcionó la técnica hoy llamada «Pound-Drever-Hall cavity stabilization» para estabilizar haces láser, que es una técnica central en el experimento LIGO.

- Russel Alan Hulse (1950), astrónomo norteamericano ganador del Premio Nobel de Física en 1993 por el descubrimiento de los llamados pulsares. Este hallazgo permitió medir de manera indirecta la existencia de ondas gravitacionales.
- Saul Perlmutter (1959), astrofísico estadounidense ganador del Premio Nobel de Física en 2011 por las observaciones que muestran una expansión acelerada del Universo.
- Steven Weinberg (1933), físico norteamericano ganador del Premio Nobel de Física en 1979 junto con Abdus Salam y Sheldon Glashow por la formulación de lo que hoy conocemos como Modelo estándar de las partículas elementales, que unifica a la Fuerza Electromagnética y la Fuerza Débil en una sola conocida como Fuerza Electrodébil. Es también un

racionalista duro que ataca al relativismo cultural y a la religión.

- Theodor Kaluza (1885-1954), físico alemán más conocido por su intento de unificar la gravedad y el electromagnetismo al añadir una quinta dimensión espacial. En esa teoría la gravedad y el electromagnetismo son la misma Fuerza que se manifiesta de manera distinta.
- Urbain Le Verrier (1811-1877), astrónomo y matemático francés que usando solo matemáticas predijo la existencia de Neptuno. Después trató de explicar el movimiento de Mercurio introduciendo un hipotético planeta al que llamó Vulcano. Esta predicción resultó fallida.
- Willem de Sitter (1872-1934), físico y astrónomo holandés que hizo contribuciones en la astronomía y propuso un modelo de Universo que lleva su nombre. El espacio de De Sitter es una solución de las ecuaciones Einstein, que describen a un Universo que se expande.

Glosario de términos

- **Antimateria.** La antimateria es idéntica a la materia excepto por el hecho de que la carga eléctrica y los números cuánticos que la caracterizan son los opuestos. Cuando la materia se encuentra con la antimateria se aniquila produciendo radiación.
- **Año luz.** Es la distancia que recorre la luz en un año. Corresponde a 9.46 billones de kilómetros.
- **Agujero negro.** Es un objeto que se ha formado con la muerte e implosión de una estrella. Produce una curvatura en el espacio-tiempo tal que otros objetos pueden caer en él pero nada puede escapar.
- **Big Bang.** Explosión que dio origen al Universo.
- **Bosón.** Es uno de los dos tipos de partículas que existen (fermiones y bosones). Las partículas mediadoras de las Fuerzas son de este tipo.
- **Campo de Higgs.** Campo al que se asocia la partícula de Higgs que fue observada en el Centro Europeo de Investigaciones Nucleares y que es responsable de darle masa a las partículas elementales.
- **Carga.** Es la propiedad que tienen algunas partículas y que define la intensidad con que interaccionan con otras. Un ejemplo familiar es la carga eléctrica para la interacción electromagnética.

- Conservación de la energía. Es un principio de la física que establece que un sistema aislado, como por ejemplo una colección de objetos, no gana o pierde energía en el tiempo.
- Curvatura. Es el grado con que se dobla una superficie y puede variar con la posición sobre la superficie. En la Teoría de la Relatividad General se asocia con la densidad de energía y materia.
- Dimensión. Cada dimensión representa una posible dirección de movimiento. La generalización de posibilidades ha llevado a pensar en dimensiones extras (más de las que podemos percibir) e incluso en dimensiones fraccionarias.
- Energía oscura. Es energía que está presente en todo el Universo. Provoca una Fuerza gravitacional repulsiva y constituye aproximadamente el 70 % del Universo.
- Fermión. Es uno de los dos tipos de partículas que existen (fermiones y bosones). Las partículas de materia son de este tipo.
- Gravitón. Partícula hipotética que transmite la Fuerza de Gravedad en un esquema en el que la interacción se ve como mediada por partículas.
- Horizonte de eventos. Es lo que marca en un agujero negro el punto de no retorno para la luz. Este horizonte separa causalmente al agujero negro de nuestro Universo.
- Interferencia. Superposición de dos o más ondas que puede ser observada por sus efectos en la intensidad de la resultante.

- Kelvin (grado). Unidad de medida de la temperatura que equivale a un grado centígrado. Una temperatura de 0 Kelvin corresponde a -273.15 °C.
- Kilonova. Así se ha sido nombrado el fenómeno en que dos estrellas de neutrones o una estrella de neutrones y un agujero negro se fusionan en un sistema binario.
- Masa. Es una medida de la resistencia que presenta un cuerpo a cambiar su estado de movimiento uniforme o de reposo.
- Masa gravitacional. Es la medida de la resistencia que presenta un cuerpo a cambiar su estado de movimiento uniforme o de reposo en la presencia de un campo gravitacional.
- Masa inercial. Es la medida de la resistencia que presenta un cuerpo al cambiar su estado de movimiento uniforme o de reposo que presenta un cuerpo cuando se aplica una fuerza.
- Masa solar. Es la masa del sol que corresponde a 2×10^{30} kilogramos. Es aproximadamente 330,000 veces la masa de la Tierra.
- Materia oscura. Es un tipo de materia que interacciona gravitacionalmente con la materia ordinaria. Constituye el 26 % del Universo. No emite ningún tipo de radiación.
- Mecánica cuántica. Teoría que describe el mundo microscópico. Establece los principios que rigen a los átomos, las moléculas, los electrones, protones, etc.

- Modelo estándar. Marco explicativo de la composición elemental de la materia que describe a las tres interacciones fundamentales: la electromagnética, la débil y la fuerte.
- Onda gravitacional. Es una perturbación del espacio-tiempo que viaja a la velocidad de la luz.
- Precesión. La rotación de un cuerpo se define en torno a un eje, cuando ese eje se mueve se dice que precesa. Se llama precesión al movimiento de los trompos cuando cabecean al girar.
- Simetría. Es la propiedad de los objetos en la naturaleza o de las ecuaciones que la describen de no cambiar cuando se las transforma de alguna manera.
- Supernova. Explosión estelar. El fenómeno es muy brillante y cuando se lo observó por primera vez se pensó que se trataba de la formación de una estrella nueva. Se lo nombró entonces «nova». Con el tiempo se quedó el nombre para la explosión que no es muy luminosa y se le agrego «súper» para aquellas explosiones en las que la luminosidad es mayor.
- Súpersimetría. Simetría extraordinaria en la que se establece una relación entre fermiones y bosones.
- Partícula virtual. Es una partícula que aparece en un determinado proceso por un tiempo tan corto que no puede ser detectado de manera directa.
- Planck (energía). Es la cantidad de energía equivalente a 1.22×10^{19} GeV y que se puede obtener combinando las constantes

naturales. Probablemente es la mayor cantidad de energía posible que se puede concentrar en un espacio definido por la longitud de Planck.

- Planck (longitud). Es la longitud por debajo de la cual se espera la aparición de los aspectos de unificación de las interacciones. Es la escala en la que se espera ver los efectos de las Teorías de Gravitación Cuántica. Equivale a 1.6×10^{-35} metros.
- Planck (tiempo). Es, presumiblemente, el intervalo de tiempo más pequeño que puede ser medido. Equivale a 5.39×10^{-44} segundos. Es el tiempo que le toma a la luz recorrer una distancia igual a la longitud de Planck.
- Púlsar. Estrella de neutrones magnetizada y que gira mientras emite radiación en la forma de un haz.
- Radiación. Es una forma de energía que se propaga, como por ejemplo la luz que es radiación electromagnética.
- Rayos gamma. Es el tipo de radiación electromagnética más energética que hay. Es más penetrante que los rayos X.
- Rompimiento de simetría. Es la desaparición de una simetría por el efecto de un fenómeno que al ser sustraído permite la recuperación de la simetría original.
- Singularidad. Término matemático para referirse a la región en la que la descripción de un fenómeno pierde sentido porque alguna cantidad se vuelve infinita.

- Simetría de norma local. Es la conservación de un sistema cuando este se transforma de manera diferente en diferentes puntos del espacio.
- Teorías de Gran Unificación. Es la teoría que describe en un solo marco de ideas a las interacciones electromagnética, débil y fuerte. De esta manera se entiende a las tres como una sola Fuerza.
- Tesseracto. Cubo en cuatro dimensiones espaciales. La figura geométrica se logra uniendo por sus vértices a dos cubos.

Referencias

- Ananthaswamy, A. (2009). «Distant light hints at size of space-time grains». *New Scientist*, 2820, p. 26.
- Barbour, J. (1999). *The End of Time*. Reino Unido: Oxford University Press.
- Boixader, G. (1996). *The Higgs Mechanism*. Obtenido de CERN Document Server: <https://cds.cern.ch/record/1221471?ln=es>
- Bowyer, S., Byram, E. T., Chubb, T. A. & Friedman, H. (1965). «Cosmic X-ray Sources». *Science*, 147, 3656, pp. 394-398.
- Calaprice, A. (2015). *Albert Einstein. El libro definitivo de citas*. Barcelona: Plataforma Editorial.
- Castelvechi, D. (2016). «LIGO detects whispers of another black-hole merger». *Nature*, 534, pp. 448–449.
- Castelvechi, D. (2016). «The black-hole collision that reshaped physics». *Nature*, 531, pp. 428-431.
- Chu, J. (2017). «LIGO and Virgo make first detection of gravitational waves produced by colliding neutron stars». Obtenido de *LIGO*: <https://www.ligo.caltech.edu/page/press-release-gw170817>
- Clavin, W. (2016). «LIGO Detects Gravitational Waves for Third Time». Obtenido de *LIGO*: <https://www.ligo.caltech.edu/page/press-release-gw170104>
- De Saint-Exupéry, A. (1943). *El principito*. Nueva York: Reynal & Hitchcock.

- Dickerson, K. (11 de febrero de 2016). «How in the world can we “hear” gravitational waves traveling from 1.3 billion light-years away?». Obtenido de *Business Insider*: <https://www.businessinsider.com/how-we-hear-gravitationalwaves-2016-2>
- Donoso, C. (18 de abril de 2013). «Los archivos secretos de Neptuno». Obtenido de *Qué pasa*: <http://www.quepasa.cl/articulo/ciencia/2013/04/3-11605-9-los-archivos-secretos-neptuno.shtml/>
- EHT. (2019). «Astronomers Capture First Image of a Black Hole». Obtenido de *Event Horizon Telescope*: <https://eventhorizontelescope.org/>
- Fischbach, E. (2015). «The fifth force: a personal history». *European Physical Journal*, 40, pp. 4-5.
- Fischbach, E., Sudarsky, D., Szafer, A., Talmadge, C. & Aronson, S. H. (1986). «Reanalysis of the Eötvös experiment». *Physical Review Letters*, 56 (1), pp. 3-6.
- Gamow, G. (1962). *Gravity*. Nueva York: Dover Publications.
- Gordon, J. (2017). *El inconcebible universo: sueños de unidad*. Ciudad de México: Sexto Piso.
- Henderson, M. (2008). «Astronomers confirm black hole at the heart of the Milky Way». Obtenido de *The Times*: <https://www.thetimes.co.uk/article/astronomers-confirm-black-hole-at-the-heart-of-the-milky-way-m0vtxv52v26>

- Krasznahorkay, A. (2016). «Observation of Anomalous Internal Pair creation in DBe : A Possible Signature of a Light, Neutral Boson». *Physical Review Letters*, 116, p. 26.
- Levy, J. (2012). *100 analogías científicas*. Ámsterdam: Librero.
- LIGO. (18 de julio de 2017). «Events». Obtenido de *Gravitational Wave Open Science Center*: <https://losc.ligo.org/events/GW150914/>
- LIGO. (2016). «Images». Obtenido de *LIGO*: <https://www.ligo.caltech.edu/images>
- LIGO. (s.f.). «What gravitational waves can tell us about colliding stars and black holes». Obtenido de *LIGO Scientific Collaboration*: <https://www.ligo.org/science/Publication-S6PE/index.php>
- Miller, D. J. (1993). «A quasi-political Explanation of the Higgs Boson; for Mr Waldegrave, UK Science Minister 1993». Obtenido de *High Energy Physics*: <http://www.hep.ucl.ac.uk/~djm/higgsa.html>
- NASA (12 de julio de 2011). «Neptune's Anniversary Portraits». Obtenido de *Hubblesite*: <http://hubblesite.org/images/gallery/69-neptune>
- Nobel Foundation Archive. (1993). «Joseph H. Taylor Jr. – Biographical». Obtenido de *NobelPrize.org*: www.nobelprize.org/prizes/physics/1993/taylor/facts/

- Poincaré, H. (12 de abril de 2013). «The Measure of Time». Obtenido de *Wikisource*: https://en.wikisource.org/wiki/The_Measure_of_Time
- Popova, M. (21 de abril de 2016). «Maria Popova Reviews Janna Levin's "Black Hole Blues"». Obtenido de *The New York Times*: <https://www.nytimes.com/2016/04/24/books/review/maria-popova-reviews-janna-levins-black-holeblues.html>
- Popova, M. (25 de abril de 2016). «A Madman Dreams of Tuning Machines: The Story of Joseph Weber, the Tragic Hero of Science Who Followed Einstein's Vision and Pioneered the Sound of Space-Time». Obtenido de *School of Physical Sciences at the University of California*: <https://ps.uci.edu/node/48962>
- Smolin, L. (2006). «Atoms of space and time». *Scientific American*, 15, pp. 56-65.
- Smolin, L. (2013). *Time reborn*. Boston: Houghton Mifflin Harcourt.
- Spanner, G. (2016). *Das geheimnis der Gravitationswellen*. Stuttgart: Kosmos.
- Universidad de Maryland (1969). *Dr. Joseph Weber with gravity wave detector*. Obtenido de la University Libraries. Digital Collection: <https://digital.lib.umd.edu/image?pid=umd:682909>
- Vaas, R. (2016). *Jenseits von Einsteins Universum*. Stuttgart: Kosmos.

- Weinberg, S. (1972). «Preface». En *S. Weinberg, Gravitation and cosmology: principles and applications of the general theory of relativity* (pp. vii-ix). Nueva York: John Wiley & Sons Inc.
- Weinstein, G. (15 de febrero de 2016). *Einstein and Gravitational Waves 1936-1938*. Obtenido de arXiv: <https://arxiv.org/abs/1602.04674>
- Wells, H. G. (1901). «First man in the moon». Obtenido de *Project Gutenberg*: <http://www.gutenberg.org/ebooks/1013>
- Wheeler, J. A. (1991). «Capítulo 5». En *Gravitation und Raumzeit* (pp. 98-99). Berlín: Spektrum.
- Wheeler, J. A. (1991). *Gravitation und Raumzeit*. Berlín: Spektrum.

Sobre el autor

GERARDO HERRERA CORRAL (1963, Delicias, Chihuahua, Mexico). Es un físico de partículas mexicano, profesor titular del Departamento de Física del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional. También colabora en ALICE (A Large Ion Collider Experiment), uno de los cuatro experimentos más importantes del Gran Colisionador de Hadrones (LHC), en Ginebra, Suiza. Es un reconocido divulgador de la ciencia, que frecuentemente imparte conferencias, publica artículos en distintos medios, y que ha escrito varios libros de divulgación científica.

