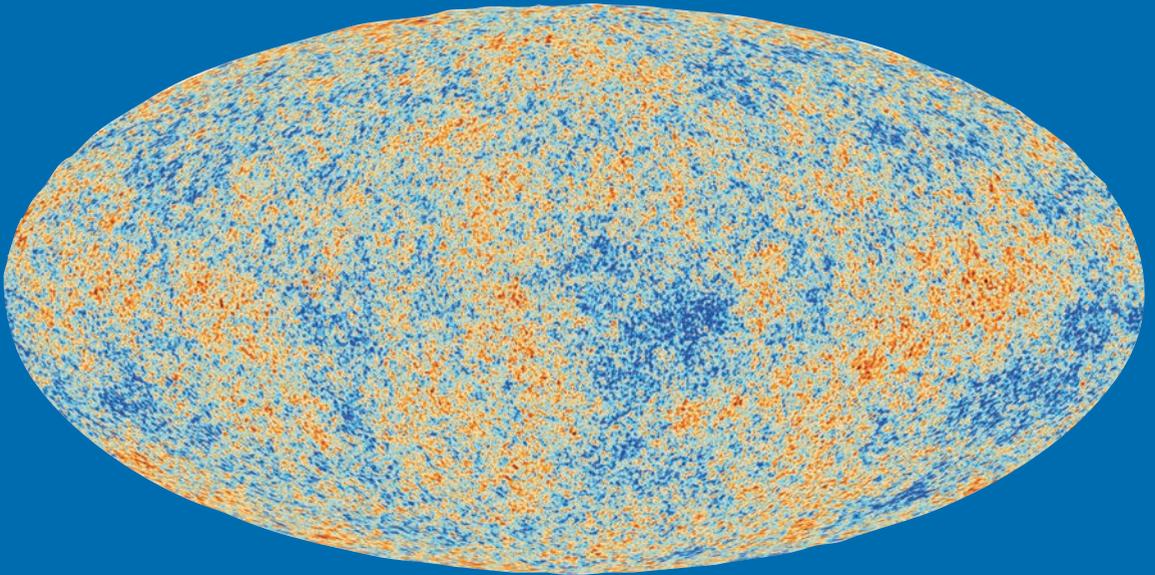




COLECCIÓN DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA

UN UNIVERSO EN
174
PÁGINAS



ENRIQUE F. BORJA

Editorial Universidad de Sevilla
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN

UN UNIVERSO EN 174 PÁGINAS

ENRIQUE F. BORJA

UN UNIVERSO EN
174
PÁGINAS



Editorial Universidad de Sevilla
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN

SEVILLA 2016

Colección: Divulgación Científica
Núm.: 18

Reservados todos los derechos. Ni la totalidad ni parte de este libro puede reproducirse o transmitirse por ningún procedimiento electrónico o mecánico, incluyendo fotocopia, grabación magnética o cualquier almacenamiento de información y sistema de recuperación, sin permiso escrito de la Editorial Universidad de Sevilla.

1ª Edición: 2015
1ª Reimpresión: 2016

Motivo de cubierta: Mapa de las fluctuaciones del fondo cósmico de microondas detectadas por el satélite PLANCK de la ESA <http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Planck>.

© EDITORIAL UNIVERSIDAD DE SEVILLA 2016
Porvenir, 27 - 41013 Sevilla.
Tlfs.: 954 487 447; 954 487 451; Fax: 954 487 443
Correo electrónico: eus4@us.es
Web: <<http://www.editorial.us.es>>

© ENRIQUE F. BORJA 2016

Impreso en papel ecológico

Impreso en España-Printed in Spain

ISBN: 978-84-472-1778-6

Depósito Legal: SE 1412-2015

Maquetación: Fernando Fernández, ed-Libros

Impresión: Podiprint - podiprint@podiprint.com

ecoedición			
Tinta sin metales pesados y papeles procedentes de una gestión forestal sostenible			
Impacto ambiental	Agotamiento de recursos fósiles	Huella de carbono	
por producto impreso	0,37 kg petróleo eq	1,12 Kg CO ₂ eq	reg. n.º: 2015/120 Más información en www.ecoedicion.es
por 100 g de producto	0,06 kg petróleo eq	0,18 Kg CO ₂ eq	
% medio de un ciudadano europeo por día	8,18 %	3,65 %	

A Juan, al que fue y al que será

ÍNDICE

Introducción	15
¿Qué sí y qué no me voy a encontrar en este libro?.....	19

CAPÍTULO I

BREVE PASEO POR LA FÍSICA DE PARTÍCULAS

1.1. Cuántica	26
Todo lo que pueda ocurrir ocurrirá muy probablemente	26
1.2. Relatividad especial	28
Masa y Energía	29
1.3. Teoría cuántica de campos	30
Campos y partículas.....	30
Creación y destrucción	31
Antimateria	32
Los experimentos de altas energías	34
<i>Probabilidades</i>	36
Propiedades de las partículas	36
Masa.....	37
Espín	38
<i>Bosones y Fermiones</i>	39
Cargas	40
1.5. El modelo estándar de la física de partículas	41
Las interacciones del modelo estándar	41
<i>La interacción electromagnética</i>	42
<i>La interacción débil</i>	42
<i>La interacción fuerte</i>	43
Los quarks.....	45
Los leptones	47
<i>Los neutrinos</i>	47
El Higgs	49
Más allá del modelo estándar	51

1.6. La gravedad.....	53
Relatividad General	53
La gravedad y la cuántica	54
El universo y la gravedad	55

CAPÍTULO II

EL UNIVERSO: KIT COSMOLÓGICO BÁSICO

2.1. El principio cosmológico	59
2.2. El universo se expande de forma acelerada	60
2.3. La materia oscura.....	64
2.4. La energía oscura	65

CAPÍTULO III

LA HISTORIA TÉRMICA DEL UNIVERSO

3.1. La época de Planck	71
3.2. La época de gran unificación	72
3.3. La época electrodébil	73
3.4. La época quark.....	74
3.5. La época hadrónica	74
3.6. La época leptónica	76
3.7. La época de fotones	76
Nucleosíntesis.....	77
El papel de la materia oscura.....	78

CAPÍTULO IV

UN GRAN HORNO MICROONDAS

4.1. El cuerpo negro.....	84
4.2. La superficie del último beso entre la radiación y la materia	87
4.3. La radiación cósmica de fondo. Sutilidades y detalles	89
4.4. Mirando las arrugas del universo.....	90
Tomándole la temperatura al cosmos.....	91
No tan homogéneo, afortunadamente.....	92

4.5. Lo que la radiación cósmica de fondo esconde el espectro de potencias	100
La información cosmológica en el espectro de potencias	102
<i>Las regiones del espectro de potencias</i>	103
<i>La geometría del universo</i>	104
<i>Dejemos hablar a los datos</i>	108
La composición del universo	110
<i>Materia bariónica y materia oscura</i>	111
<i>La energía oscura</i>	115
Los datos actuales	116
4.6 Modelo cosmológico. Teoría y observación	117

CAPÍTULO V

LA INFLACIÓN COSMOLÓGICA

5.1. Ni fue <i>big</i> , ni hizo <i>bang</i>	125
5.2. Los problemas de la cosmología estándar	127
El problema del horizonte.....	127
El problema de la planitud.....	128
El problema de los monopolos	128
Graves problemas requieren magníficas respuestas	129
5.3. La idea de la inflación	129
Cuestión de vacío.....	130
<i>Falso vacío y vacío real</i>	132
<i>El vacío real</i>	133
<i>El falso vacío</i>	134
Los caprichos de la gravedad.....	137
5.4. La imagen del origen del universo.....	138
Antes del origen.....	138
La transición de falso vacío a vacío real.....	139
Aparece un universo	140
Los problemas del universo se curan con la inflación	142
<i>El problema del horizonte</i>	143
<i>El problema de la planitud</i>	143

5.5. Predicciones de la inflación	144
El universo tiene que ser plano	144
El patrón de fluctuaciones del fondo cósmico de microondas.....	144
Los flecos por recortar	145
<i>El inflatón</i>	145
<i>Polarización del fondo cósmico</i>	145
<i>El inicio de la inflación</i>	147
<i>La salida de la inflación</i>	147
5.6. Permíteme que divague.....	148
El origen de la idea de multiverso en la teoría inflacionaria.....	149
Concluyendo sobre el multiverso	151

CAPÍTULO VI

EL UNIVERSO EN UN ORDENADOR

6.1. La idea.....	158
6.2. ¿Qué buscamos en una simulación del universo?.....	159
6.3. Mirando nuestro universo	160
6.4. El proyecto Illustris.....	163
BIBLIOGRAFÍA COMENTADA.....	169
Capítulo 1.....	170
Capítulo 2.....	171
Capítulo 3.....	171
Capítulo 4.....	172
Capítulo 5.....	173
Capítulo 6.....	174







INTRODUCCIÓN

Si alguna vez has tenido la suerte de pasar la noche al raso en algún lugar alejado de ciudades y pueblos, habrás notado el pellizco en el estómago que se siente al mirar al cielo (figura 1). No es difícil imaginar lo que sintieron los primeros seres conscientes de sí mismos al descubrirse inmersos en un mar de estrellas. No nos debe extrañar que la cuestión acerca del origen, evolución y constitución del universo haya sido, es y será una de las más persistentes preguntas que se plantea la humanidad.

En la actualidad vivimos en un tiempo afortunado en lo tocante a la información que somos capaces de obtener de nuestro universo. El estudio de la cosmología, parte de la ciencia que estudia el origen y evolución del universo, ha entrado en su madurez. Hoy día la pertinaz cuestión acerca del origen del universo ha dejado de pertenecer al reino de



Figura 1: Vía Láctea

la filosofía para convertirse en una pregunta científica de pleno derecho. Gracias a los avances tecnológicos podemos tener mejores telescopios y usar radiaciones electromagnéticas que no son visibles con el ojo humano, como ondas de radio, rayos X o rayos gamma, para verles las tripas a galaxias y otros objetos celestes. Podemos medir la energía del espacio que nos rodea con precisiones inimaginables hace tan solo un par de décadas. La cosmología se nutre de un cuerpo teórico y experimental que se ramifica desde la física de partículas hasta la astrofísica observacional. Podemos decir que el universo es un objeto de estudio físico bien definido y que cada vez tenemos un mejor entendimiento sobre su origen, evolución y estructura.

¿Por qué otro libro de divulgación sobre el universo? Las razones son múltiples, y tal vez innecesarias; déjenme exponer algunas de ellas.

- Porque me apetece. Sí, esta es la principal razón. Escribir sobre un tema siempre te ayuda a entenderlo mejor y ese es mi principal objetivo aquí: disfrutar y entender mejor todo este batiburrillo de ideas, observaciones, especulaciones, etc. Jamás he aprendido más que cuando he tenido que explicar algo a un nivel popular. Tan solo espero que el aprendizaje lo hagamos juntos en lo que va a durar este paseo por el universo en 174 páginas.
- Estamos viviendo, y en un futuro próximo será aún más patente, una época dorada en cosmología. Cada vez tenemos mejores herramientas observacionales para contrastar datos con teorías. Cada vez nos vamos a acercar más al mismo origen del universo y a su posible final. Creo que son razones más que suficientes como para tener un idea aproximada de cómo se están desarrollando estos descubrimientos.
- Me gustaría aclarar, especialmente a mí mismo, algunos puntos delicados en este asunto cosmológico. Siempre he tenido la sensación de que uno nunca sabe muy bien cuándo está leyendo algo que es aceptado por tener respaldo observacional o experimental o cuándo está frente a una pura especulación teórica que, aunque consistente con el esquema matemático de turno, aún no ha sido refutada por el experimento o la observación.
- Y por último, aunque no menos importante —*siempre quise escribir esto*—, estás tú. Gracias por abrir este libro. Supongo que tendrás

curiosidad por esto de la cosmología y el universo, así que espero poder satisfacer, aunque solo sea un poco, algo de la misma. En realidad, lo que más me gustaría es dejarte mucho peor de lo que has empezado, en lo que a la curiosidad se refiere. La ciencia es así, cuando uno cree haber entendido algo se da cuenta de que aún le queda mucho más por entender. Si no lo consigo la culpa es toda mía.

¿QUÉ SÍ Y QUÉ NO ME VOY A ENCONTRAR EN ESTE LIBRO?

Lo que vamos a encontrar en este libro es un intento de presentar la cosmología de una forma ordenada. Prescindiremos de los vericuetos históricos y nos centraremos en lo que conocemos del universo. Nuestro objetivo es entender la siguiente afirmación:

*Nuestro universo tuvo su origen en un proceso de expansión muy fuerte de corta duración denominado **proceso inflacionario**. En la actualidad, se está expandiendo aceleradamente, es plano y está compuesto principalmente por materia y energía oscura. La materia usual –la que nos conforma– solo es un 5%, aproximadamente, de la composición del universo. La estructura a gran escala del mismo, es decir, la forma en la que las galaxias se distribuyen, tiene su origen en fluctuaciones cuánticas que sucedieron en el origen.*

Esta afirmación es la que podemos encontrar en multitud de textos de popularización de la cosmología. Esencialmente condensa lo que hemos aprendido del universo en los últimos cincuenta años, desde que fuimos capaces de someter nuestras teorías cosmológicas al escrutinio de las observaciones.

Para conseguir esta meta dividiremos el libro en los siguientes capítulos:

- **Capítulo 1:** Nos adentraremos en el mundo de las partículas elementales y sus interacciones. Se da el caso de que para entender la evolución del universo uno ha de buscar sus claves en la física de lo más pequeño, de los ladrillos básicos de la materia que nos compone. En este capítulo nos enfrentaremos a una terminología técnica que conviene conocer. Intentaremos que la experiencia sea lo menos traumática posible.

- **Capítulo 2:** En este apartado haremos una descripción del universo en el que nos encontramos. Muchas de las características del mismo tienen su origen en su nacimiento y en la forma en la que ha ido evolucionando. La información en este apartado está bien asentada en las evidencias observacionales que hemos ido acumulando en cosmología durante las últimas décadas.
- En el **capítulo 3** nos dedicaremos a describir cómo ha ido evolucionando el universo desde su nacimiento hasta nuestros días. El esquema general está bien fundamentado, pero aún quedan muchos detalles poco conocidos sobre los cuales hay una gran actividad investigadora. En un futuro próximo muchas cuestiones abiertas en lo tocante a la evolución del universo obtendrán respuestas; es, por lo tanto, importante saber dónde nos encontramos y qué podemos esperar de la investigación en el campo.
- Sin ninguna duda, la mejor herramienta de la que disponemos para estudiar el universo es la **radiación cósmica de fondo**. Dedicaremos el **capítulo 4** a estudiar esta radiación y a entender cómo se puede extraer información relativa al universo a partir de ella. Cada vez aprendemos más cosas de esta radiación que permea el universo, por lo que es fundamental tener un buen entendimiento de sus características. Aprender a leer esta radiación es esencial para poder seguir las venideras noticias que nos deparará la cosmología en los próximos años.
- Respecto a la cuestión del origen del universo, de cómo se formó todo, no hay una respuesta final bien establecida aún. Sin embargo, cada vez tenemos una mejor imagen cualitativa sobre dicho origen. La teoría que ha superado hasta la fecha todos los test observacionales ha sido la **teoría inflacionaria**. En el **capítulo 5** nos dedicaremos al estudio de esta teoría, a lo que ya sabemos sin ningún género de dudas y los detalles que aún no han sido esclarecidos por experimentos u observaciones.
- Por último, en el **capítulo 6** nos enfrentaremos a las actuales simulaciones computacionales sobre la evolución y estructura del universo. Estas simulaciones son herramientas muy poderosas para comprobar que nuestras teorías reproducen universos como el nuestro. Cada día se tiene mayor potencia de cálculo, mayor poder de resolución y un mejor entendimiento de las condiciones

iniciales del universo que generan, tras su evolución en el tiempo, el cosmos que nos contiene.

Intentaré reducir al mínimo los argumentos demasiado técnicos en la exposición de este tema. Iré directamente al grano en muchas discusiones, intentando proporcionar un conjunto de ideas que retener en la cabeza para todo aquel que se acerque a este libro. Este no es un libro para convertirnos en doctores en cosmología, sino para disfrutar con los resultados y las ideas involucradas en el estudio del universo. También eludiré, en la medida de lo posible, discusiones sobre temas que están en la frontera de lo conocido en el ámbito teórico, restringiéndome a lo que es aceptado por haber obtenido un respaldo observacional claro.

La cosmología es una épica empresa acometida por la humanidad desde su aparición. Es la rama de la ciencia que nos enfrenta a nuestra grandeza y nuestra pequeñez en comparación con este universo en el que nos desenvolvemos. Hay muchas cuestiones que encienden la emoción y curiosidad del ser humano, de entre las cuales el universo está entre las primeras. Como dijo un tal Albert: «que podamos comprender el universo es incomprendible», o algo así.

Espero que disfruten la lectura de este libro. Cualquier comentario, crítica o duda la pueden referir a la siguiente dirección de correo electrónico:

cuentos.cuanticos@gmail.com





CAPÍTULO I

BREVE PASEO POR LA FÍSICA
DE PARTÍCULAS

Te puede resultar curioso que un libro sobre cosmología comience discutiendo la física de las partículas elementales, pero, como veremos, esto no es un capricho. La cosmología es el estudio del universo en su conjunto, como una entidad dinámica que evoluciona y que cambia con el tiempo. Durante algunas de las etapas iniciales del universo este era tan energético que las leyes físicas que regían su evolución eran muy diferentes de las que operan hoy día en nuestra escala de energía. Durante esas etapas el contenido de partículas era diferente al que nos conforma a nosotros y a todo lo que nos rodea. Por este motivo es más que pertinente empezar un libro de divulgación sobre cosmología discutiendo la física de los constituyentes elementales de la materia.

Este capítulo es importante porque en él nos dotaremos de un conjunto nuevo de palabrejas que designan partículas e interacciones. Aprenderemos someramente cuáles son las formas de interactuar que tienen los campos de nuestro universo. Todo esto nos ayudará a comprender mejor su evolución y podremos hacernos una mejor imagen de las diferentes etapas por las que ha pasado el mismo.

El estudio de las partículas fundamentales es en la actualidad uno de los campos de la física con más repercusión y con más frentes abiertos. Con la última generación de aceleradores, encabezados por el LHC (*Large Hadron Collider*, Gran Colisionador de Hadrones) del CERN, estamos llegando a profundizar en la constitución íntima de la materia, observando nuevos campos, entendiendo el origen de la masa y descubriendo nuevos estados de la materia más exóticos que los cotidianos sólido, líquido y vapor. Así pues, le vamos a dedicar a este tema unas cuantas páginas. Iremos

al grano, sin entrar en muchas disquisiciones técnicas ni detenernos en las múltiples e interesantes incógnitas que plantea la física de partículas. Lo que quiero es dar una imagen general, aclarar algunos conceptos y poner a vuestra disposición algo de la terminología propia del campo.

1.1. CUÁNTICA

Para empezar a hablar de partículas elementales es ineludible acercarse a las ideas que provienen de la mecánica cuántica. En esta sección simplemente haremos un resumen de los puntos básicos esenciales para poder seguir el hilo argumental del capítulo.

La mecánica cuántica supone el enfrentamiento del ser humano a una cruda realidad. La naturaleza es mucho más compleja y elaborada de lo que podíamos imaginar basándonos en nuestras experiencias cotidianas. En cuántica los sistemas se pueden comportar de extrañas maneras, bajo nuestro punto de vista, y pueden sufrir procesos sorprendentes. Esta es la rama de la ciencia que con mayor facilidad nos sitúa al borde de la desesperación y la frustración al intentar explicarla y ejemplificarla con nociones de la física que nos gobierna a nuestra escala.

Todo lo que pueda ocurrir ocurrirá muy probablemente

Cuando aplicamos las reglas cuánticas para definir el comportamiento de un sistema físico nos encontramos con que nociones fuertemente enraizadas en nuestro cerebro sufren una severa conmoción.

La cuántica nos obliga a aceptar que los sistemas no tienen una entidad propia bien definida, es decir, no podemos catalogarlos como ondas o como partículas, no podemos decir en todos los casos su energía exacta y no siempre podemos definir pares de magnitudes que nos parecen naturales, como su posición o su velocidad.

La descripción mecanocuántica de los sistemas nos obliga a aceptar que un sistema no está perfectamente definido para cualquier magnitud que queramos estudiar del mismo. Para empezar, un sistema en términos cuánticos no siempre puede tener cualquier energía. Generalmente, los sistemas que sufren interacciones solo pueden tener unos valores definidos de

la energía y no cualquier otro. De hecho, catalogamos sus estados físicos realizables en términos de sus valores permitidos para la energía.

Esto pudiera no parecer muy sorprendente, pero la cosa se complica cuando nos damos cuenta de que hay sistemas que están en un estado cuya energía no está definida. ¿Qué quiere decir esto? Pues que es usual que al preparar muchas copias idénticas del mismo sistema, todas preparadas del mismo modo, cuando medimos la energía de cada copia unas veces obtendremos un valor y otras veces otro. Podemos obtener dos, tres, cuatro o más valores distintos de energía para copias exactas del mismo sistema en el mismo estado. ¿Cuál es la energía del sistema? Pues tenemos que concluir que el sistema no tiene un valor definido de la energía. Lo que podemos asegurar es que cuando midamos tal magnitud en tal sistema obtendremos uno de sus valores permitidos y ningún otro.

¿Quiere decir esto que la cuántica no tiene poder predictivo? Todo lo contrario, la cuántica es una de las teorías físicas mejor comprobadas experimentalmente de toda la historia de la humanidad. En el siglo y pico que tiene de vida ha superado todas las pruebas experimentales hasta la fecha. Eso tiene mucho mérito, porque se han diseñado experimentos con el firme propósito de demostrar que la cuántica no podría explicarlos. Sorprendentemente, los fenómenos estudiados en esos experimentos siempre han dado los resultados predichos por la cuántica.

A estas alturas de la película hemos de abandonar la idea de que los sistemas tienen todas sus propiedades bien definidas en cualquier situación. La cuántica nos dice que una determinada magnitud tiene un conjunto posible de valores que son los que obtendremos en una medida de la misma. Lo que es aún mejor, la cuántica predice con qué probabilidad obtendremos un resultado concreto dentro de todos los posibles. Así pues, cuando realizamos experimentos en el ámbito cuántico lo que hacemos es repetirlos una y otra vez de forma que se acumulen los suficientes resultados como para ser capaces de concluir que los resultados son los predichos por la cuántica y que aparecen con la probabilidad que establece la teoría.

Este es el fundamento de todas las maravillas cuánticas, el efecto túnel, el láser, las resonancias magnéticas nucleares, los transistores. Podemos asegurar que todas las tecnologías y todos los avances en física en los últimos 70 años han tenido que ver directa o indirectamente con la mecánica cuántica.

1.2. RELATIVIDAD ESPECIAL

Este es otro de los pilares fundamentales de la física actual y también supuso una revolución en nuestra forma de entender cosas tan básicas como el espacio y el tiempo.

La relatividad especial se fundamenta en la idea de que la física ha de ser igual para todo observador que se esté moviendo a velocidad constante y en línea recta. Esta parece una idea fácil de aceptar.

Otro punto esencial es que cualquiera de estos observadores percibe que hay una velocidad privilegiada, que es la misma para todos independientemente de hacia dónde se estén moviendo y con qué velocidad siempre y cuando esta sea constante. Esta velocidad es la velocidad de la luz en el vacío.

Esto significa que si alguien nos lanza un rayo de luz y nosotros nos acercamos a velocidad constante hacia el que nos envía el rayo, mediremos una velocidad de la luz en el vacío que será idéntica a la que mediría otro que se estuviera alejando en línea recta y a velocidad constante del que nos envía el rayo. Esto contrasta con nuestra experiencia: si un coche se mueve en una línea recta de derecha a izquierda a 50 km/h respecto de un observador externo y yo me muevo de izquierda a derecha respecto de dicho observador a 50 km/h, el coche se moverá respecto a mí a 100 km/h. Si en vez de ser un coche es un rayo de luz, tanto para mí como para el observador externo dicho rayo se moverá a la velocidad de la luz en el vacío. Esta velocidad tiene el archiconocido valor de 299 792 458 m/s, que se toma como un valor exacto en física.

Estas simples pero profundas ideas nos obligan a aceptar que nuestras medidas de longitudes y tiempo son relativas al observador. Algo que estando en reposo relativo respecto a nosotros mide un metro, si lo viéramos moverse respecto a nosotros a velocidad constante y en línea recta en cualquier dirección lo veríamos con una longitud más pequeña. Si tenemos un reloj en nuestra muñeca veremos cómo marca el tiempo con un cierto ritmo; sin embargo, el mismo reloj con las mismas condiciones de funcionamiento moviéndose respecto a nosotros lo veríamos marcando el tiempo a un ritmo más lento, es decir, los intervalos temporales se dilatarían.

Cuestiones como estas pueden poner en un aprieto a una pareja de gemelos si uno de ellos decide hacer un viaje en cohete.

La teoría de la relatividad no implica que todo sea relativo. Al contrario, lo que nos dice es que hay dos elementos de la realidad que son los mismos para todos los observadores que se mueven en línea recta y a velocidad constante. Estos elementos son la velocidad de la luz en el vacío y las leyes físicas. Toda la física debe de ser construida de tal forma que estas condiciones se verifiquen. Para ello debemos aceptar que nuestras ideas previas acerca del espacio y el tiempo no eran las más adecuadas.

Una de las consecuencias más conocidas de la teoría relativista es que se establece que la energía de la luz en el vacío es la máxima velocidad con la que se puede propagar un sistema por el espaciotiempo. Ningún cuerpo con masa puede llegar a adquirir la velocidad de la luz.

Masa y Energía

La consecuencia de la relatividad especial con mayor influencia en el tema que nos ocupa es la equivalencia entre masa y energía.

Es una sensación personal, pero la ecuación más conocida de la física posiblemente sea:

$$E=mc^2,$$

donde m es la masa de una partícula y c es la velocidad de la luz en el vacío. ¿Qué es E ?

Esa E es la energía a la que corresponde la masa m . Esta ecuación no por conocida es la mejor entendida de la física a niveles populares. Más bien al contrario.

La información contenida en dicha ecuación revela que la masa no es más que una manifestación más de la energía. Pero eso no significa que todo lo que tiene energía tenga que tener masa. Hay partículas sin masa que tienen energía. ¿Cómo puede ser esto posible? La respuesta a esa pregunta radica en el hecho de que esa ecuación solo es válida para partículas que están en reposo respecto a los observadores que miden la masa. Dicho

de otro modo, para medir la masa de un sistema tenemos que estar en reposo relativo con él.

Si el sistema está en movimiento respecto a nosotros, su energía total tiene dos componentes, uno debido a su masa y otro debido a su movimiento. Los sistemas tienen más o menos energía en tanto en cuanto su movimiento se desarrolle a mayor o menor velocidad, o de otras características intrínsecas de las partículas. Ahora bien, pensemos qué ocurre cuando tenemos una partícula que se mueve a la velocidad de la luz. Según la relatividad esa partícula tiene que tener la velocidad de la luz para cualquier observador que se mueva en línea recta y a velocidad constante. Por lo tanto, no puede estar en reposo respecto a ningún observador, así que no tiene sentido plantearse la cuestión de medir su masa. La relatividad especial nos dice que la masa de las partículas que se mueven a la velocidad de la luz es nula, toda su energía procede de sus características internas.

¿Cómo debemos interpretar la ecuación de marras –siempre teniendo en cuenta que no es la más general posible para la energía de un sistema–? Teniendo en mente que representa la opción de convertir la masa de una partícula en otra forma posible de energía y viceversa. Una cantidad de energía se puede transformar en sistemas con masa de forma que se verifique la equivalencia.

1.3. TEORÍA CUÁNTICA DE CAMPOS

Una de las construcciones más espectaculares de todo el edificio de la física procede de la unión de los principios de la cuántica con los de la relatividad especial. De esta unión nace un marco teórico, la **teoría cuántica de campos**, que nos ha permitido llegar a describir la estructura más básica de la materia, las interacciones físicas, e ir mucho más allá de las partículas que nos conforman. Además, gracias a los aceleradores de partículas y demás experimentos de la física de partículas hemos podido comprobar las predicciones de esta teoría de forma espectacular durante las últimas décadas.

Campos y partículas

Un campo físico consiste en la asignación de una determinada magnitud física a cada punto de una región del espacio. Por ejemplo, si fuéramos capaces

de medir la temperatura de cada punto de nuestra habitación, tendríamos definido el campo de temperaturas de la misma. En física se habla de campos de fuerzas, campos eléctricos, campos gravitatorios, etc. La idea es la misma, uno calcula la fuerza, el campo eléctrico o la gravedad en cada punto del espacio bajo estudio y así tiene definido el correspondiente campo.

Un hecho magnífico que surge de la unión entre la relatividad especial y la cuántica se manifiesta cuando aplicamos estos principios a la descripción de un campo. Si tomamos el campo electromagnético y le aplicamos los principios relativistas y cuánticos, el resultado es que el campo se nos presenta como un conjunto de partículas. Dichas partículas están indefectiblemente asociadas a su campo: si encontramos las partículas asociadas al campo electromagnético, los fotones, podemos decir que existe dicho campo, y viceversa, si en una región existe el campo electromagnético podremos encontrar sus partículas asociadas.

Así, cuando hablamos de partículas tenemos que tener en mente que están asociadas a un determinado campo. Esta es una de las consecuencias más profundas de la teoría cuántica de campos. Cuando hablemos de electrones, fotones, etc., tenemos que tener claro que son excitaciones de un campo, fluctuaciones que adquieren una serie de propiedades como la de tener una masa, un espín y unas cargas definidas. Estos conceptos los discutiremos someramente en breve.

Quiero insistir en esta relación: un campo, una partícula. Así es como opera la teoría cuántica de campos. Este es un concepto bastante abstracto que ha sido verificado en multitud de experimentos y así es como un físico entiende la física fundamental. No pensemos que las partículas son canicas o bolas, son simplemente la manifestación cuántica de un campo y como tal están sujetas a los extraños comportamientos que introduce la cuántica en la física.

Creación y destrucción

Un detalle maravilloso asociado a este constructo teórico que conviene degustar es uno de los pilares fundamentales de la teoría cuántica de campos. En dicho esquema teórico hemos dicho que hay una relación entre campos y partículas:

Campos <=====>Partículas

¿Dónde están esas partículas? Prepárate para la respuesta porque es bastante desconcertante. Esas partículas no están en ningún sitio, el formalismo de la teoría cuántica de campos nos dice que esas partículas se crean y se destruyen continuamente en las interacciones que sufre el campo en cuestión que estamos estudiando.

Sí, has leído bien, se crean y se destruyen. En cuántica estos procesos no es que estén permitidos, es que son inevitables. Un campo evoluciona creando y destruyendo sus partículas asociadas, que aparecen y desaparecen, pudiendo estos procesos inducir creaciones y destrucciones de otras partículas asociadas a otros campos con los que estén interactuando.

Como veis esta es una novedosa forma, y totalmente alejada de nuestra experiencia cotidiana, de entender las interacciones.

Detente un segundo a pensar sobre esto, saboréalo. Un campo no tiene un número definido de sus partículas asociadas en una determinada región. Estas pueden aumentar o disminuir su número, bien espontáneamente, bien de forma inducida por la interacción con otros campos.

Por supuesto estos procesos no son totalmente arbitrarios, sino que están sujetos a leyes de conservación, de la energía, de las cargas involucradas, etc.

Antimateria

No podemos dejar esta resumida presentación de la teoría cuántica de campos sin hablar de una de sus más formidables predicciones, la existencia de la **antimateria**. La antimateria no es una entelequia de la ciencia ficción. La antimateria es uno de los triunfos más espectaculares de la teoría cuántica de campos.

La razón de ser de la antimateria es la relatividad especial, es decir, la antimateria existe por la presencia de los principios de la relatividad especial en el seno de la construcción de la teoría cuántica de campos. Por lo tanto, encontrar la existencia de la antimateria es una de las más fuertes comprobaciones experimentales de la relatividad especial.

El descubrimiento de la antimateria fue al principio puramente teórico. En el inicio de la construcción de la teoría cuántica de campos los físicos descubrieron que las ecuaciones que describían las partículas asociadas a un campo describían algo más. Ese algo más que describen las ecuaciones es que cada campo puede generar dos tipos de partículas asociadas que tienen sus mismas propiedades básicas como su masa o su espín, pero con sus cargas aditivas cambiadas de signo. Por ejemplo, al intentar describir un electrón combinando los principios relativistas con los de la cuántica se encontraba que aparece otra partícula, el positrón, que tiene la misma masa que el electrón, el mismo espín, pero la carga eléctrica está cambiada de signo.

Además, se descubrió que cuando una partícula se encuentra con una de sus antipartículas estas tienen una tendencia, una alta probabilidad, de aniquilarse. Es decir, la interacción que sufren hace que estas partículas desaparezcan y la energía que poseían se transforma en fotones, las partículas asociadas a la interacción electromagnética. De hecho, existe la posibilidad de que se creen otros pares de partículas siempre que el proceso respete los preceptivos principios de conservación. Y viceversa, dos fotones pueden desaparecer al interactuar y crearse en el proceso un par de partícula/antipartícula. El par creado puede ser compuesto de partículas de mayor o menor masa en función de la energía inicial que tuvieran los fotones en interacción. Aquí se ve un ejemplo crudo de la incidencia de la ecuación $E=mc^2$ en este contexto.

Hoy día laboratorios de todo el mundo pueden generar antimateria en pequeños aceleradores y hay técnicas de diagnóstico médico que se basan en ella. El PET (**Positron Emission Tomography**, Tomografía por Emisión de Positrones) es una técnica muy útil que emplea antielectrones, los positrones, para monitorizar el metabolismo celular con alta precisión.

La existencia de la antimateria es un triunfo y una derrota al mismo tiempo. Las leyes físicas establecidas por la teoría cuántica de campos parece que obligan a que siempre se creen en este tipo de procesos pares de partícula/antipartícula. Eso supone un problema en cosmología, ya que se supone que el universo estaba compuesto por partículas muy energéticas. Dichas partículas sufrirían procesos de desaparición, que técnicamente los físicos llaman de decaimiento, en los que producirían el mismo número de partículas y antipartículas. Pero eso supone que dichos pares acabarían

desapareciendo y generando una sopa de radiación en el universo. Sin embargo, nuestro universo está compuesto por materia y no por antimateria, así que tenemos que explicar qué mecanismo físico fue capaz de romper el balance entre partículas y antipartículas para dejar un remanente de partículas que evolucionó hasta conformar el universo que nos rodea. Aún no hay ninguna teoría que pueda explicar este tipo de proceso de asimetría materia/antimateria, pero se espera que en un futuro próximo los experimentos arrojen luz sobre este problema.

Los experimentos de altas energías

Los experimentos típicos de la física de partículas consisten en dotar a partículas de mucha energía y lanzarlas unas contra otras. Así de simple. Este es el fundamento de los aceleradores de partículas. La física experimental es muy rica y muy amplia pero no podemos dar cuenta aquí de todas las técnicas experimentales, así que nos centraremos en la idea básica detrás de los grandes aceleradores.

Tomemos por ejemplo el LHC del CERN. En este acelerador se aceleran protones, en sentidos contrarios, hasta velocidades cercanas a la velocidad de la luz y se hacen colisionar unos con otros. De los resultados de la colisión salen otras partículas que son medidas cuando interactúan con detectores dispuestos alrededor de la zona de colisión.

De aquí podríamos extraer la imagen errónea de que las partículas generadas en el experimento salen del interior de los protones por el efecto de la rotura de los mismos en las brutales colisiones a las que los obligamos. Afortunadamente ya hemos visto los detalles de la teoría cuántica de campos y por lo tanto podemos entender que lo que pasa en dichos experimentos es algo muy diferente que pasamos a describir en una lista de simples pasos.

- En el LHC los protones son acelerados por poderosos imanes. Como hemos discutido ya, esto consigue que la energía de la partícula aumente mucho. Por un lado tendrá la contribución de su masa y por el otro tendrá la energía adquirida por el aumento de su velocidad. Efecto neto, aumento de la energía de los protones.

- Se lanzan dos haces de protones acelerados unos contra otros. Esto vuelve a incrementar la energía efectiva de la colisión. Es más efectivo en términos energéticos lanzar dos haces acelerados unos contra otros que lanzar un solo haz sobre un blanco fijo. Con esto incrementamos mucho la energía de los procesos que se van a llevar a cabo.
- Los protones llegan a una zona de colisión. Pero, ojo, estas colisiones no son como choques de canicas. Cuando hablamos de colisión lo que estamos diciendo es que acercamos tanto los protones que facilitamos su mutua interacción.
- Como veremos más adelante, los protones son partículas compuestas por otras. En el interior de los protones hay todo un marémagnum de quarks y gluones, de los que hablaremos en breve. Por lo tanto, lo que estamos forzando es que esas partículas interactúen unas con otras a muy alta energía.
- Ya hemos discutido que las interacciones en teoría cuántica de campos, que es la teoría que describe estos procesos, se fundamentan en que unas partículas desaparecen y otras aparecen. Las partículas que aparecen no existían previamente, literalmente se han creado en el proceso por las leyes cuánticas y obedeciendo a múltiples leyes de conservación.
- Lo que se genera en el proceso de interacción es un estado altamente energético del cual pueden aparecer otras partículas como producto del proceso. Son estas partículas creadas a muy alta energía las que son interesantes de estudiar.

La imagen es muy elegante y muy bella. Las colisiones no sacan a la luz partículas que están dentro de las colisionadas, sino que crean nuevas partículas que no existían previamente.

Necesitamos de este tipo de experimentos porque hay partículas que solo pueden existir en un ambiente muy energético, como el generado por el acelerador. Pensemos lo siguiente: supongamos que generamos una partícula de muy alta masa; esta partícula empezaría a propagarse y se encontraría inmersa en un ambiente de poca energía comparada con ella. Entonces, la teoría cuántica de campos nos dice que esa partícula sufrirá un proceso de desintegración por el cual se destruirá espontáneamente para crear nuevas partículas más ligeras, de forma que no sean estados muy

energéticos respecto al medio que las contiene. Esta es la razón por la que se habla de partículas estables y de partículas inestables que se desintegran de forma espontánea en partículas más ligeras.

Probabilidades

Lo que la teoría cuántica de campos nos dice es qué partículas nuevas se generan en este tipo de experimentos y la probabilidad con la que se crean. Una colisión determinada entre dos protones, por poner un ejemplo, a una energía dada es capaz de producir multitud de partículas finales. Hay tantas configuraciones finales como las que estén permitidas por la energía del proceso y las leyes de conservación. Unas situaciones finales serán más probables que otras y en algunas colisiones se generarán partículas estables y en otras, partículas inestables que a su vez sufrirán un proceso de desintegración espontánea. Los modelos teóricos tienen que proporcionar esos detalles, todas las configuraciones de partículas finales de una colisión. Tienen que identificar cuáles de esos resultados de las colisiones acabarán con partículas estables y cuáles con partículas inestables.

Por eso, en los aceleradores de partículas se hacen colisionar millones de partículas originales y se estudian los resultados de estas colisiones. Si el resultado coincide con la aparición de las partículas predicha por la teoría y con la probabilidad con la que se espera que aparezca una determinada situación final, entonces podemos confiar en el modelo teórico.

Propiedades de las partículas

Las partículas, que en este contexto no son más que excitaciones cuánticas asociadas a un campo en particular, presentan determinadas propiedades que dictaminan su posible comportamiento y la forma en la que pueden interactuar entre sí. Estas propiedades dependerán del campo que da origen a las partículas.

Lo maravilloso de este asunto es que estas propiedades están relacionadas íntimamente con las propiedades de la naturaleza directamente asociadas a su esencia relativista. Es decir, podemos predecir sus valores y su comportamiento gracias a haber descubierto que la relatividad es parte esencial del funcionamiento físico del universo.

Las propiedades que vamos a tratar son la masa, el espín y las cargas que presentan las distintas partículas existentes. La discusión en esta sección se limitará a una descripción del significado y utilidad de dichas propiedades.

Masa

Las partículas tienen masa. Eso es un hecho empírico innegable y además tenemos evidencia directa de ella. La masa es un concepto físico que ha propiciado numerosas discusiones a lo largo de la historia de la física y el intento de definirla nos ha llevado a la elaboración de interesantes teorías y a descubrir sorprendentes propiedades de la naturaleza.

Generalmente tenemos una asociación mental muy fuerte entre masa y peso. Esto es inevitable, porque nuestro cerebro se ha desarrollado en un contexto en el que actúa continuamente la gravedad, y el peso no es más que la fuerza de la gravedad actuando sobre un cuerpo con masa. Sin embargo, en este tema de las partículas elementales tenemos que olvidarnos un poco de la gravedad por motivos que expondremos en una sección posterior. Por lo tanto, la masa en este caso nos indica la inercia de las partículas, es decir, su reticencia a acelerarse, a cambiar su estado de movimiento.

Imaginemos que hemos nacido en una estación orbital. Como sabréis en ese caso viviríamos en un ambiente de gravedad cero flotando continuamente por ahí. Pero la masa, nuestra masa, seguiría teniendo una función física. Si queremos acelerar un objeto en nuestra estación orbital aplicando una fuerza fija lograremos mayores aceleraciones para cuerpos de menor masa que para cuerpos de mayor masa. Ese es el sentido de la masa que usaremos en lo tocante a la física de partículas.

Por otro lado, la masa nos da una indicación de lo costoso que es, energéticamente hablando, crear una determinada partícula. Que un campo cuántico cree una partícula ligera es más fácil, y por lo tanto más probable, que estar en la situación de crear una partícula más masiva. Además, cuanto mayor es la masa de una partícula menor es su vida media. Como hemos explicado anteriormente, un campo puede crear partículas, hacerlas aparecer. La cuántica, pedestremente hablando, nos dirá que la probabilidad de crear dichas partículas será menor cuanto mayor sea la masa de la partícula creada.

La masa también da una idea de la estabilidad de una partícula. Las partículas muy pesadas tienen una tendencia general a decaer en otras partículas más ligeras siempre que la configuración final tenga la misma energía que la inicial y se conserven otras propiedades fundamentales.

La física admite que las partículas tengan masa nula, lo que significará que dichas partículas se mueven a la velocidad de la luz en el vacío. Si una partícula se mueve a la velocidad de la luz solo puede moverse a dicha velocidad. No puede ser acelerada o desacelerada. Por lo tanto, la idea que tenemos que capturar es que cuando decimos que una partícula tiene masa nula solo estamos diciendo que se mueve a la velocidad de la luz. Ni más, ni menos.

Espín

El espín es una propiedad intrínseca de las partículas, como la masa o las cargas. Aquí vamos a dar una definición utilitarista, no entraremos en la esencia última del concepto, solo en su manifestación y en sus características y únicamente referida a partículas elementales. El espín tiene una relación íntima con el momento angular, la magnitud física relacionada con la rotación de los sistemas, y en sistemas compuestos, como átomos o moléculas, la física involucrada tiene una gran riqueza.

Podemos decir que el espín es una característica puramente cuántica de las partículas cuyo origen está enraizado en propiedades deducidas de la relatividad especial. No existe ningún análogo en nuestra vida cotidiana que se comporte igual que esta propiedad. En la historia de la física primero se descubrió el espín experimentalmente y posteriormente se encontró la explicación teórica, solo tras unir en la teoría cuántica de campos los principios relativistas y los principios de la mecánica cuántica.

Esta propiedad de las partículas tiene varias propiedades que tenemos que conocer:

- Permite a las partículas interactuar con el campo magnético, es decir, dota a las partículas de las propiedades de comportarse, ante la presencia de campos magnéticos, como imanes fundamentales.

- La teoría predice los valores que puede tomar esta propiedad. Dichos valores son números enteros o semienteros (fracciones de numerador entero y denominador dos).

Hay un aspecto que convierte al espín en una cantidad fundamental en física. Dependiendo de si las partículas tienen un espín entero o un espín semientero se comportarán de formas muy diferentes cuando tengamos un sistema formado por un alto número de cada una de estas clases de partículas.

Bosones y Fermiones

En física clasificamos las partículas en dos clases en función de su espín:

- Bosones – Partículas de espín entero: 0, 1, 2, etc.
- Fermiones – Partículas de espín semientero: $1/2$, $3/2$, $5/2$, etc.

Esta clasificación no es arbitraria ni gratuita. Dado un campo, todas sus partículas asociadas tienen el mismo espín, por tanto, son todas partículas bosónicas o todas partículas fermiónicas. Resulta que ser bosón o fermión condiciona el comportamiento de las partículas de forma dramática.

Los bosones, cuando se encuentran en alto número, no tienen ningún problema en disponerse todos en el mismo estado. Es decir, podemos tener tantos bosones como queramos en el mismo estado. Esto da lugar a comportamientos colectivos muy sorprendentes y este tipo de partículas están detrás de la razón de existencia de láseres, superconductores, etc. Cuando muchas partículas bosónicas idénticas se encuentran en el mismo estado se alcanza un estado de la materia exótico, el condensado de Bose.

Los fermiones, por el contrario, tienen el comportamiento diametralmente opuesto. No es posible tener dos partículas fermiónicas en el mismo estado. Si forzamos a dos fermiones a estar en el mismo estado aparece una interacción repulsiva que impide que los dispongamos a ambos en dicho estado. Este comportamiento explica cosas que van desde propiedades químicas fundamentales –ya que la química está determinada por las propiedades de los electrones, que son fermiones de espín $1/2$ –, hasta la estabilidad de las estrellas de neutrones.

Cargas

Las partículas interactúan, se atraen, se repelen, cambian sus identidades, etc. Lo que hace a una partícula capaz de interactuar con un determinado campo, o con las partículas asociadas a este, es que tenga una carga específica que sea capaz de hacer sentir a la partícula que va a interactuar la presencia del campo que le va a producir la interacción.

La noción de cargas que todos tenemos en la cabeza es la de carga eléctrica. Sabemos que hay dos clases de cargas eléctricas, las positivas y las negativas, y sabemos que las cargas de igual signo se repelen y las de distinto signo se atraen. Pero también sabemos que las partículas cargadas interactúan atrayéndose o repeliéndose porque sienten el campo eléctrico que genera una y otra partícula. Según lo que hemos dicho, las cargas eléctricas son las propiedades de las partículas que les permiten sentir y generar campo eléctrico.

Cuando introducimos las nociones cuánticas sabemos que cada partícula está asociada a un campo concreto. Por lo tanto un electrón se podrá entender como una manifestación de un campo que vamos a llamar campo electrónico. Dos electrones, dos excitaciones del campo electrónico, generan campo electromagnético, y las partículas asociadas a este campo son los fotones. Desde el punto de vista cuántico la repulsión entre dos electrones se entiende del siguiente modo:

- Un electrón, gracias a su carga eléctrica, excita el campo eléctrico y se crea un fotón. El proceso de creación de dicho fotón requiere energía y esta sale de la energía del electrón que altera su movimiento.
- Este fotón se propaga hasta que llega al otro electrón, que es capaz de sentirlo gracias a su carga eléctrica. El fotón desaparece, se destruye, dándole su energía al segundo electrón, que entonces cambia su estado de movimiento.
- El efecto neto es el de repulsión de los electrones.

Por supuesto, esto que hemos explicado aquí es una visión muy simplificada de la forma en la que las interacciones cuánticas se llevan a cabo. Pero en esencia esa es la idea que todo físico tiene en la cabeza cuando imagina las interacciones. Como veremos, hay distintas interacciones asociadas a distintos campos y cada una de esas interacciones está relacionada con una carga específica de las partículas.

La idea que hay que fijar en la cabeza es que las cargas son las propiedades que permiten a las partículas interactuar unas con otras.

Otro aspecto fundamental de las cargas asociadas a las interacciones es que son cargas conservadas. Por ejemplo, la cantidad total de carga en cualquier proceso electromagnético tiene que verificar que es la misma al inicio y al final.

1.5. EL MODELO ESTÁNDAR DE LA FÍSICA DE PARTÍCULAS

En la actualidad podemos decir orgullosos que tenemos un esquema teórico que ha sido capaz de predecir todos los hechos experimentales sobre física de partículas realizados hasta la fecha. Ese modelo teórico se conoce como **modelo estándar**. El modelo estándar de las partículas fundamentales nos dota de dos informaciones. Por un lado, identifica cuáles son las partículas de las que están formadas todas las cosas que nos rodean y, por otro, es capaz de explicar desde el punto de vista cuántico tres de las cuatro interacciones de la naturaleza.

Las partículas tienen cuatro interacciones fundamentales: la interacción gravitatoria, la interacción electromagnética, la interacción débil y la interacción fuerte. Las partículas no tienen otra forma de interactuar fuera de esas cuatro.

En este apartado vamos a presentar el modelo estándar con las partículas que conforman la materia y las que median las interacciones. El objetivo último de esta tarea es el de entender la ilustración de la figura 1.1.

Hemos descubierto que las partículas que conforman la materia son todas fermiones y las que producen las interacciones son todas bosones. Esa es la primera categoría que tenemos que conocer.

Las interacciones del modelo estándar

Dediquemos un momento a estudiar las interacciones del modelo estándar. Estas son todas las interacciones no gravitatorias, la electromagnética, la débil y la fuerte. Todos los procesos físicos elementales se rigen por estas interacciones, ni una más, ni una menos.

La interacción electromagnética

Esta interacción está generada por el campo electromagnético que en su versión cuántica está asociado al fotón. El fotón es una partícula de espín 1; es, por lo tanto, un bosón. No tiene masa ni carga eléctrica. El alcance de la interacción electromagnética es infinito.

Tomando como referencia la interacción gravitatoria, la interacción electromagnética tiene una intensidad de 10^{36} . Es decir, es mucho más potente que la gravedad.

Las carga que permite a las partículas interactuar con el campo electromagnético es la carga eléctrica, que tiene dos signos, positivo y negativo.

La interacción débil

De la interacción débil no tenemos ninguna evidencia cotidiana como del electromagnetismo, su efecto no consiste en repulsiones o atracciones. La interacción débil es la que produce cambios en las identidades de las partículas que la sienten.

A causa de esta interacción un neutrón se destruye y se crea un protón, un electrón y un antineutrino. Como hemos explicado antes, eso no quiere decir que dentro del neutrón esté el protón, el electrón y antineutrino, estas partículas aparecen a causa del efecto de la interacción débil que obliga al neutrón a cambiar su naturaleza.

Esta interacción es responsable de multitud de fenómenos radiactivos naturales.

Cuánticamente la interacción débil genera tres partículas: el bosón W, que se presenta en dos versiones, uno con carga eléctrica negativa y otro con carga eléctrica positiva, y el bosón Z, que es neutro. Todos estos bosones tienen espín 1. Estos bosones tienen masa, de hecho, una masa de aproximadamente 100 veces la masa del protón, bastante alta para una partícula portadora de interacción. Esto conlleva que la interacción tenga un alcance muy corto, de unos 10^{-18} metros, y que su efecto sea mucho más débil que el electromagnetismo. La intensidad de esta interacción respecto de la interac-

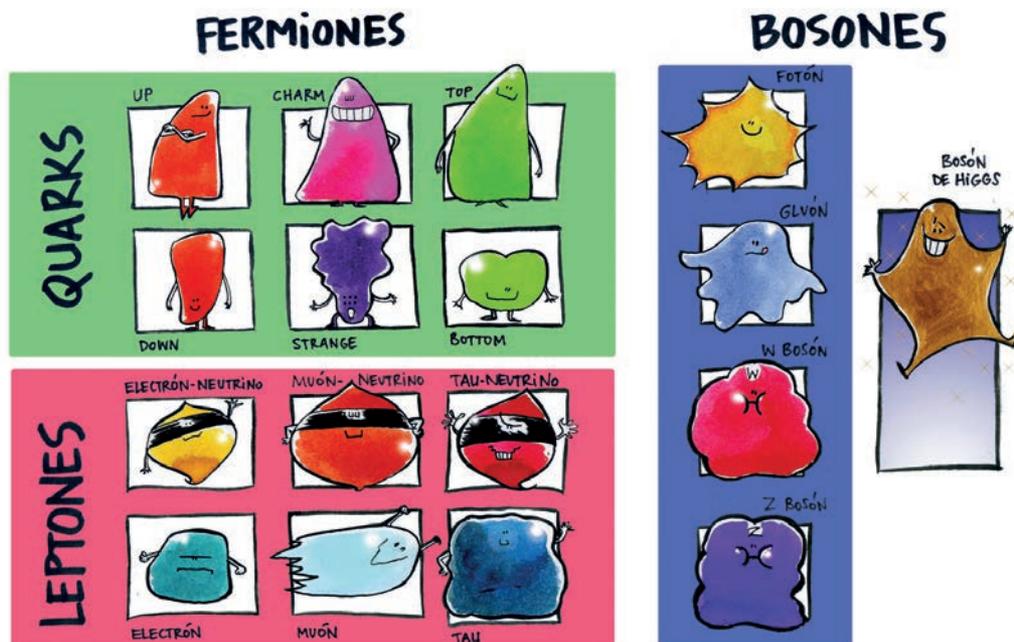


Figura 1.1. Maravillosa vista artística de las partículas del modelo estándar de Raquel García Ulldemolins.

ción gravitatoria es de un factor 10^{25} , lo que significa que tiene una intensidad once órdenes de magnitud menor que la electromagnética.

La carga asociada a la interacción débil es lo que se conoce como el sabor de las partículas. Por supuesto que solo es un nombre, el sabor de las partículas simplemente significa el tipo de partícula, el tipo de quark o de leptón con el que nos estemos enfrentando.

La interacción fuerte

Esta es la interacción que permite la existencia de los núcleos atómicos, entre otras cosas. Es una interacción muy intensa, tanto como para vencer la repulsión de los protones, que tienen carga eléctrica positiva, y mantenerlos confinados en un espacio tan pequeño como el de un núcleo atómico. En realidad la interacción fuerte, como comentaremos, es la que actúa sobre los quarks.

Desde el punto de vista cuántico esta interacción está mediada por los denominados gluones. Estos gluones son bosones de espín 1, no tienen carga eléctrica y no tienen masa.

A la vista de las características de los gluones, podríamos concluir que son muy parecidos al fotón y que el alcance de la interacción fuerte debiera ser infinito, como en el caso del electromagnetismo. Es evidente que ese no es el caso, la interacción fuerte tiene un alcance muy limitado, del orden del tamaño nuclear a lo sumo, aproximadamente de 10^{-15} metros. La razón de este comportamiento es que los gluones **sí** tienen carga fuerte, es decir, interactúan entre ellos mismos con la misma intensidad que transmiten la interacción entre quarks.

La carga fuerte se denomina carga de **color**. De ningún modo hace referencia a que las partículas tengan un determinado color, es tan solo un nombre y los físicos son muy aficionados a los nombres con chispa en el tema este de las partículas elementales. La carga de color se puede presentar en seis posibles tipos: azul, rojo y verde y sus correspondientes anticolores, antiazul, antirrojo y antiverde. Existen combinaciones neutras de esta carga de color, de igual forma que un sistema formado por una carga positiva y una carga negativa desde el exterior nos parece un sistema sin carga. Estas combinaciones neutras solo se consiguen combinando tres partículas cuyas cargas de color sean azul, roja y verde, o antirroja, antiazul y antiverde. También conseguiremos una combinación neutra combinando dos partículas que porten un determinado color y su anticolor.

Esta interacción supone un caso muy interesante en física de partículas debido a sus características, que la diferencian de la interacción electromagnética o gravitatoria, que son nuestras referencias mentales para estos temas. El caso es que la interacción fuerte tiene las siguientes propiedades:

- Su intensidad aumenta con la distancia. Dos partículas unidas por esta atracción la sienten con mayor intensidad si intentamos alejarlas. Por otro lado, cuando las partículas están muy juntas prácticamente no sienten la interacción, se comportan como si estuvieran libres. Esta propiedad se conoce en los círculos técnicos como **libertad asintótica**.
- Esta interacción no solo admite configuraciones neutras de color. Así, solo hemos observado de forma estable configuraciones de

tres partículas, cada una de ellas con un color diferente, o configuraciones de una partícula y una antipartícula que portan un color y su correspondiente anticolor.

- Es la más intensa de las interacciones conocidas, su valor respecto de la interacción gravitatoria es de 10^{38} , cien veces más potente que la electromagnética.

El problema de la libertad asintótica y de la existencia únicamente de configuraciones neutras de color da lugar a la propiedad de confinamiento. A saber, no hay posibilidad alguna de encontrar libremente circulando por ahí una partícula que tenga un color neto. Esto hace que los quarks, que son las partículas con cargas de color, no se encuentre libres en la naturaleza, sino siempre formando agrupaciones de tres quarks o de un quark y un antiquark.

No tenemos ninguna explicación definitiva a este hecho, es decir, no sabemos aún los detalles que llevan a las partículas portadoras de carga fuerte a formar agrupaciones neutras y confinadas. Dicho de otra forma, no sabemos explicar la estructura del protón o del neutrón partiendo de los quarks que los componen.

Los quarks

Los quarks son partículas fermiónicas, tienen espín $1/2$ y carga eléctrica. Hay seis quarks distintos. Repasemos las propiedades que han sido verificadas experimentalmente.

- Quark up – El más ligero de los quarks. Tiene espín $1/2$ y una carga eléctrica positiva que equivale a $2/3$ de la carga del electrón en valor absoluto.
- Quark down – Quark con espín $1/2$, fermión y carga eléctrica negativa de valor $-1/3$ de la carga del electrón en valor absoluto.

Estos son los dos quarks de la llamada primera generación. Como ya habíamos adelantado, los quarks son las partículas que poseen carga de color.

Los quarks up y down son los que conforman protones y neutrones. Un protón está formado por dos quarks tipo up y un quark tipo down formando una configuración neutra de color. Si tenemos en cuenta sus respectivas

cargas eléctricas, deduciremos que el protón tiene una carga positiva de valor unidad tomando la carga del electrón en valor absoluto como referencia. Un neutrón es una configuración de dos quarks down y un quark up. Es, por lo tanto, una partícula eléctricamente neutra.

El resto de quarks conforman la segunda y la tercera generación y no se presentan a nuestro alrededor formando partículas. Sabemos de su existencia porque los hemos generado en experimentos de altas energías. Sus propiedades son las mismas que las de los quarks up y down según su posición en la tabla. La diferencia estriba en que la masa de cada generación es más elevada que la anterior. Este es el motivo de que las partículas formadas por estos quarks no se presenten a nuestro alrededor y tengamos que crearlas en los experimentos. Su masa es tan elevada que hace que sean partículas inestables. Para hacernos una idea, el quark top es tan pesado como un núcleo completo de oro.

Las partículas compuestas por quarks, que son las únicas que sienten la interacción fuerte, se denominan **hadrones**. Y dentro de los hadrones hay dos clases:

- **Bariones** – Son hadrones formados por tres quarks o tres antiquarks.
- **Mesones** – Son hadrones formados por un quark y un antiquark en una configuración neutra de color.

Por lo tanto, si estudiamos un protón diremos que es un fermión porque tiene espín $1/2$. Además, es un hadrón porque siente la interacción fuerte y, más concretamente, es un barión, ya que es una combinación de tres quarks. Sin duda, un buen batiburrillo de nombres.

Aquí se hace necesario un comentario acerca de la interacción débil. Su verdadera acción, como hemos comentado, consiste en cambiar la identidad de las partículas. Hemos puesto el ejemplo de un neutrón que se transforma en un protón, un electrón y un antineutrino. En realidad, la interacción débil en este ejemplo opera a niveles de quarks, y lo que hace es cambiar un quark down de un neutrón en un quark up; por lo tanto, el efecto es que partimos de dos quarks down y un quark up y terminamos con una partícula formada por un quark down y dos quarks up, un protón.

Así que los quarks, por el hecho de presentarse en distintos sabores –tipos de partículas– sienten también la interacción débil.

Los leptones

El otro gran tipo de partículas son los leptones. Las partículas leptónicas son aquellas que no sienten la interacción fuerte. Por lo tanto, los leptones solo interactúan bajo la interacción débil y la electromagnética, en caso de tener carga eléctrica.

Los leptones también se presentan en tres generaciones, como se ve en la figura 1.1. En la primera fila del grupo de los leptones aparecen el electrón, el muón y el tau. Estas partículas son fermiones de espín $1/2$ y todas poseen carga eléctrica negativa, la carga del electrón. El muón y el tau son copias del electrón mucho más masivas que este, 200 y 3000 veces respectivamente, y por lo tanto inestables. Estas partículas son capaces de interactuar vía débil y vía electromagnética. La interacción débil las podrá convertir unas en otras.

Los leptones no pueden interactuar bajo la interacción fuerte, pero eso no los hace indiferentes a los quarks. Quarks y leptones se pueden influir mutuamente a través de las interacciones electromagnética y débil.

Todavía nos queda dar cuenta de la segunda fila de partículas en el apartado de los leptones. Esta está formada por los neutrinos, pero estas partículas merecen una sección para ellas solas.

Los neutrinos

Los neutrinos son fermiones de espín $1/2$, no poseen carga eléctrica –lo que no les permite interactuar de forma electromagnética– y son leptones, por lo que tampoco sienten la interacción fuerte. Así, estas partículas únicamente pueden interactuar mediante la interacción débil.

Esto hace que los neutrinos sean unas partículas realmente elusivas. Su detección es ciertamente una tarea formidable, ya que son capaces de pasarse por la materia sin interactuar prácticamente con nada. Sus interacciones son muy débiles y poco frecuentes. Sin embargo, estas partículas no

son extrañas, hoy sabemos que se producen en gran número en reacciones termonucleares y radiactivas. Por tanto, estemos siendo atravesados continuamente por neutrinos que se han producido en las reacciones nucleares que tienen lugar en el interior de nuestro Sol y que pasan a través de nuestra estrella y viajan hasta nosotros atravesándonos, y a toda la Tierra, como si nada se interpusiera en su camino. Hoy somos capaces de detectar estos neutrinos a costa de tener enormes detectores con una masa muy grande, lo que es necesario para que haya muchas partículas y así aumentar la probabilidad de que un neutrino interactúe débilmente con alguna de ellas y poder detectar el resultado de la interacción. Estas propiedades de los neutrinos que los hacen tan difíciles de detectar los convierten a su vez en magníficos informadores de procesos a los que tenemos un difícil acceso. Neutrinos generados en reacciones del núcleo de estrellas, en explosiones supernovas, en el interior de reactores nucleares, etc. llegan a nuestros detectores sin haber sufrido modificaciones desde su origen, por lo tanto, guardan muchos secretos de los procesos que los han originado.

Podemos decir que los neutrinos existen y que además se presentan en tres clases: el neutrino electrónico, el muónico y el tau. Podemos diferenciar entre estas clases de neutrinos porque sienten interacciones distintas. Así, un neutrino (antineutrino) electrónico siempre aparece cuando una interacción débil genera un electrón o positrón, y análogamente para los otros tipos de neutrinos.

El hecho de que haya varias clases de neutrinos les permite tener un comportamiento inesperado. Si generamos un neutrino de uno de los tipos y lo dejamos propagarse irá cambiando espontáneamente de una clase a otra. Es decir, podemos generar neutrinos electrónicos y, si luego intentamos detectarlos a una determinada distancia, encontraremos que nos llegan muchos menos que los esperados. Si ampliamos el experimento para poder detectar todos los tipos de neutrinos veremos cómo el número detectado es justamente el total esperado en un principio. Esta es una característica esencial de los neutrinos y al fenómeno se le denomina **oscilación de neutrinos**.

Que los neutrinos sufran este tipo de proceso es muy sorprendente. En el modelo estándar los neutrinos aparecen como partículas sin masa, serían partículas que se moverían a la velocidad de la luz. Sin embargo, el fenómeno de oscilación de neutrinos no podría darse a no ser que la diferencia

de masas entre distintos tipos de neutrinos fuera distinta de cero. Es decir, el proceso de oscilación de neutrinos es una prueba experimental de que las diferencias de masas de los distintos tipos de neutrinos no es nula. Por lo tanto, tenemos que concluir que los neutrinos tienen masa.

El hecho de que los neutrinos tengan masa es un problema en la física actual. Aún no hemos sido capaces de estimar la masa de cada uno de los tipos de neutrinos, solo sabemos que la diferencia entre las masas de los mismos es no nula, pero no podemos saber la masa de cada tipo por sí misma. Pero que los neutrinos tengan masa indica claramente que hay física de la que el modelo estándar no da cuenta y que hay que seguir estudiando para encontrar un nuevo marco teórico que contenga a este modelo y lo generalice para acomodar nuevos procesos entre partículas.

Otra cuestión que trae de cabeza a los físicos es el problema de saber si el neutrino y el antineutrino son partículas distintas o son la misma partícula. Dado que el neutrino es una partícula neutra y que no tiene carga de color, se puede dar el caso de que sea su propia antipartícula, como lo es el fotón. Hay en la actualidad muchos experimentos en marcha intentando resolver este rompecabezas. Saber si los neutrinos son sus propias antipartículas o no lo son es vital para la física, ya que el que se dé un caso u otro podrá ser la llave para entender otros problemas fundamentales en física, como la asimetría materia/antimateria.

Sin duda, el estudio de los neutrinos nos proporcionará en un futuro próximo grandes noticias y nos dará muchas respuestas que, mucho me temo, generarán muchas más preguntas.

El Higgs

Nos ocuparemos ahora del último de los miembros del modelo estándar, el Higgs, que tan famoso ha sido en los últimos tiempos debido al anuncio por parte del CERN de su descubrimiento el verano de 2012 y su confirmación en marzo de 2013 en los experimentos realizados en el LHC.

Para entender la importancia del Higgs tenemos que hablar de la estructura del modelo estándar. Cuando se llegó a su definición los físicos estaban maravillados por la estructura matemática del modelo, que es ciertamente elegante y bien fundamentada. Sin embargo, había una trampa. El

modelo estándar predice que la masa de todas las partículas que describe es nula. Todas las partículas se deberían mover a la velocidad de la luz. Pero eso es a todas luces falso. Tenemos una constancia directa de que las partículas tienen masa. Lo peor de todo es que cuando intentaron forzar al modelo estándar a que acomodara las masas de sus partículas, todo el constructo teórico/matemático se derrumbaba. Es decir, el modelo estándar no acepta que se le introduzca la masa de forma bruta a no ser que queramos destruir el propio modelo.

Los físicos se empeñaron en encontrar una forma de generar masa de las partículas sin que ello dañara la estructura del modelo estándar. Se produjeron muchos modelos que conseguían en el plano teórico este objetivo, pero el que ha triunfado ha sido el modelo que Higgs, y de forma independiente Brout y Englert, introdujeron en la década de los 60 del pasado siglo.

La idea es simple: en el universo tenemos un campo, el campo de Higgs, que es capaz de interactuar con quarks, leptones y bosones W y Z. El efecto de esta interacción se muestra como la adquisición de masa por parte de estas partículas. Por el contrario, los fotones son insensibles a este campo y por lo tanto permanecen como partículas sin masa en la actualidad.

¿Cómo demostrar que existe este campo de Higgs? La respuesta debe ser ya evidente para todos nosotros. Este campo tiene que tener asociadas partículas siguiendo el esquema que nos marca la teoría cuántica de campos. La teoría del campo de Higgs predice que tiene que ser un bosón de espín 0, con carga eléctrica neutra y una masa de aproximadamente 250 000 veces la masa del electrón o, lo que es lo mismo, unas 137 veces la masa del protón.

Eso es lo que se ha detectado en el experimento del LHC, una partícula con esas propiedades y que además presenta todas las formas de desintegración que la teoría predice que el bosón de Higgs debería verificar y con las propiedades adecuadas. Así es como se confirma un resultado teórico en física de partículas.

Más allá del modelo estándar

El modelo estándar es una teoría maravillosa que se ha visto confirmada hasta un grado de precisión asombroso en todos los experimentos de física de partículas realizados hasta la fecha. Sin embargo, hay evidencias de que hay física que no puede ser descrita por este modelo y se tendrán que construir teorías más generales para dar cuenta de nuevos fenómenos.

Una enumeración incompleta de los problemas que el modelo estándar no puede responder es la siguiente:

- El modelo estándar no puede explicar la masa del bosón de Higgs. Dicha masa depende de detalles de la física propios de escalas de energías que no son accesibles a nuestros experimentos. Así, para poder explicar por qué el Higgs tiene la masa que tiene requerimos nuevas ideas que están siendo sondeadas a nivel teórico. Hay muchos modelos propuestos. Se espera que el LHC arroje luz sobre esta cuestión en el futuro próximo cuando alcance su pleno rendimiento energético.
- Hay indicaciones de que en la física se debe dar una correspondencia entre bosones y fermiones. Es decir, por cada fermión existente debería existir un bosón relacionado y viceversa y uno se podría transformar en otro. Esta relación entre fermiones y bosones asociados es lo que se denomina **supersimetría**. Esta es una idea magnífica, y muy bella matemáticamente hablando, que podría solucionar muchos de los problemas del modelo estándar. Sin embargo, la supersimetría nos dice que para todas las partículas que vemos tendríamos que observar partículas asociadas (bosón-fermión, fermión-bosón) con la misma masa que las que observamos. Por lo tanto, deberíamos observar los pares supersimétricos y cada miembro de un par supersimétrico se debería generar con la misma probabilidad en los experimentos de alta energía. Pero eso no ocurre, no hemos detectado ningún compañero supersimétrico de las partículas conocidas. El motivo puede radicar en que haya algún mecanismo que haga que cuando se genere un par supersimétrico uno de sus miembros adquiera poca masa y el otro una masa muy elevada. Si este es el caso, necesitaríamos experimentos a muy alta energía para poder generar estas hipotéticas partículas supersimétricas compañeras de las partículas ya conocidas. El LHC tiene por

objetivo encontrar estas partículas y demostrar la existencia de la supersimetría o condenarla al cajón de las buenas ideas que no se realizan físicamente. Con todos los experimentos acumulados hasta nuestros días la supersimetría está muy acotada, debería aparecer en la próxima tanda de colisiones del LHC o su existencia estará muy en entredicho.

- Otro punto interesante es el de la unificación de las interacciones fundamentales. Como hemos dicho existen cuatro interacciones, de las que el modelo estándar se ocupa de tres. Pero la realidad es que estas interacciones se modifican con la energía de los procesos en los que las estudiamos. Hoy tenemos una constancia experimental de que la interacción electromagnética y la interacción débil se funden en una única interacción, **la interacción electrodébil**. Esto quiere decir que a altas energías, que son fácilmente alcanzables por nuestros aceleradores, no existe el electromagnetismo independientemente de la interacción débil, ambas interacciones tienen la misma intensidad y el mismo alcance. Los bosones propios del electromagnetismo –los fotones– y los débiles –los W y Z–, que a nuestra escala de energías son muy diferentes, se transforman en altas energías, siendo todos ellos bosones sin masa, y son los portadores de la interacción electrodébil. Los físicos tienen esperanza de que si llegamos a energías lo suficientemente altas la interacción electrodébil y la fuerte se fundirán en una única interacción denominada de gran unificación. Así, gluones, fotones y bosones W y Z tendrían las mismas propiedades; de hecho, no existirían como tal y aparecerían como nuevos bosones que en este contexto se denominan **bosones X**. Para verificar esta idea tendremos que desarrollar experimentos que nos permitan alcanzar formidables energías. Por ahora la cosa está lejos desde el punto de vista tecnológico y, lo que es peor, desde el punto de vista económico.

Todos estos temas suponen un nuevo desafío intelectual y tecnológico del cual obtendremos enormes beneficios tanto en conocimientos como en avances que podremos luego importar a la sociedad. Queda mucho por descubrir y aquí estaremos para contarlo y disfrutarlo.

1.6. LA GRAVEDAD

No hemos dicho nada sobre la gravedad, que es posiblemente la interacción de la que tenemos más experiencia, ya que estamos inmersos en un campo gravitatorio durante toda nuestra vida.

Sobre la gravedad suelen existir algunas ideas fuertemente arraigadas en nuestro conocimiento que no son del todo correctas. Suponemos que lo que genera y siente la interacción gravitatoria es la masa de los sistemas, lo cual es correcto pero incompleto. Ahora sabemos que es la energía de los sistemas –y la masa no es más que una forma de energía– la que genera y siente la gravedad. Un cuerpo de una determinada masa genera un campo gravitatorio que podemos calcular, y ese mismo cuerpo generará una mayor gravedad si está en movimiento. Así que desde ahora pensaremos que la carga gravitatoria, la propiedad de los sistemas que les permiten generar y sentir la gravedad, es la energía en general y no solo la masa.

Siempre suponemos que la gravedad es un tipo de fuerza, un tirón atractivo que un sistema ejerce sobre otro. Pero la descripción de la gravedad que mejor verificación experimental ha obtenido a lo largo de los años es la proporcionada por la relatividad general.

Relatividad General

La relatividad general es otra de las maravillas del conocimiento humano. Esta teoría supuso un cambio en la forma de entender la gravedad. Con ella se abandonó la tradición newtoniana basada en la noción de fuerza para explicar los fenómenos gravitatorios como la manifestación de la geometría del espaciotiempo. En relatividad general el espaciotiempo es capaz de interactuar con el resto de campos físicos.

Hasta la llegada de la relatividad general el espaciotiempo se consideraba un contenedor inerte que se limitaba a acomodar partículas y campos que pueden interactuar entre sí pero que no altera la estructura del contenedor, el espaciotiempo. El gran avance de Einstein fue el de notar que la gravedad no es más que la forma en que la geometría del espaciotiempo se acomoda a la distribución de energía, y sus flujos, del resto de campos. Es decir, la geometría del espaciotiempo es una entidad dinámica que siente, evoluciona y se acomoda al resto de campos.

Cuando Newton describe la interacción entre el Sol y la Tierra establece que el uno y el otro generan fuerzas que obligan al sistema a girar el uno respecto del otro. Para Einstein la interacción gravitatoria entre el Sol y la Tierra se explica diciendo que ambos cuerpos, debido a su energía, conforman el espaciotiempo a su alrededor de forma que siguen los caminos que dictamina esta geometría.

Esto da lugar a consecuencias interesantes. Por ejemplo, si un fotón viaja en las inmediaciones de un cuerpo muy masivo su trayectoria se curvará porque sigue la geometría del espaciotiempo generada por dicho cuerpo. Esto ha sido confirmado observacionalmente con las conocidas como **lentes gravitacionales**. Este efecto hace que una fuente luminosa lejana (galaxias, quásares, etc.) cambie su posición en el cielo cuando un objeto muy masivo, con mucha gravedad, se interpone entre la fuente luminosa y nosotros. Esta es la manifestación de que el rayo de luz que está viajando en línea recta se encuentra con una geometría del espaciotiempo curvada y curva su propio camino dando lugar al efecto óptico de aparentar que el objeto ha cambiado su posición. También pueden aparecer duplicaciones del objeto en el cielo. Notemos que esto es interesante por dos motivos: primero, porque nos dice que la gravedad es justamente la manifestación de la geometría del espaciotiempo; segundo, porque demuestra que los fotones, que son partículas sin masa pero con energía, sienten el efecto de dicha geometría, de la gravedad.

La gravedad y la cuántica

Desde el mismo origen de la cuántica a principios del siglo pasado los científicos intentaron definir una teoría cuántica de la gravedad. Esta empresa ha sido infructuosa. Las razones son múltiples y todas ellas radican en motivos demasiado abstractos como para poder dar una explicación satisfactoria en este texto. No faltan las propuestas para unir gravedad con cuántica, entre las más populares las supercuerdas y la gravedad cuántica de lazos [Green, Bojo]. Aunque sus aparatos matemáticos son muy contundentes y bien establecidos, ninguna de las dos ha conseguido demostrar que son plenamente consistentes ni han predicho fenómenos mecanocuánticos de la gravedad que se puedan comprobar en nuestros laboratorios o con nuestras observaciones astrofísicas o cosmológicas.

La falta de una explicación cuántica de la gravedad es la responsable de que no haya referencia a dicha interacción en el modelo estándar. Pero tenemos suerte, el rango de energías en el que hemos podido experimentar con las partículas fundamentales es insensible a la gravedad. La gravedad es una interacción muy poco intensa en relación a las tres restantes, así que su influencia en el comportamiento de las partículas es irrelevante. La gravedad cuántica solo sería esencial para entender el origen mismo del universo o el comportamiento de los agujeros negros, que son situaciones extremas en términos energéticos.

El universo y la gravedad

La gravedad es la interacción fundamental para entender la evolución y estructura del universo. La razón es que esta interacción es puramente atractiva en condiciones normales y actúa sobre todos los campos y partículas asociadas, por lo que se da un fenómeno acumulativo.

Además, el rango de alcance de la gravedad es infinito en contraposición con los reducidos alcances de las interacciones débil y fuerte. La única interacción que podría competir a escalas cosmológicas con la gravedad sería el electromagnetismo, que también tiene alcance infinito y es mucho más potente. Sin embargo, en el universo hay un balance exacto entre cargas positivas y negativas, así que sus efectos electromagnéticos se compensan sin que exista un campo neto de este tipo que permea todo el universo.

La cosmología es el estudio de la evolución de todo el universo, de todo lo que contiene, y de la gravedad que todo ello genera. Esta ciencia solo pudo ser posible con la aparición de la relatividad general.

Todas las civilizaciones desde el nacimiento de la humanidad se han preguntado acerca del origen, estructura y evolución del universo. En la actualidad la cosmología es una parte de pleno derecho de la ciencia, apoyada por modelos teóricos y por observaciones y experimentos que nos permiten afirmar que estamos acercándonos a ese objetivo del conocimiento. En este libro se describe la cosmología actual, mezclando la descripción de nuestras mejores herramientas observacionales para el estudio del universo y las teorías que están siendo seleccionadas por las observaciones. Nuestro universo existe, tuvo un origen, está compuesto mayoritariamente por cosas que no entendemos, la materia y la energía oscura, y se está expandiendo aceleradamente. Y lo mejor de todo, es que aún nos queda mucho por descubrir y por aprender.

