

Recuerda

Los rayos cósmicos

Los rayos cósmicos son partículas muy energéticas que llegan a la Tierra procedentes del espacio exterior.

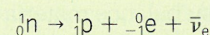
Al interactuar con la materia presente en la atmósfera, producen otras partículas que pueden detectarse en la superficie, como los muones.

Recuerda

La desintegración beta

La radiación beta que aparece en algunos procesos radiactivos está formada por electrones.

Resultan de la conversión de un neutrón en un protón. En el proceso también se libera un tipo de neutrino: antineutrino electrónico.



1 Partículas menores que el átomo. Quarks

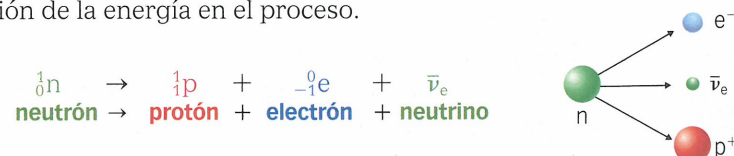
1.1. El descubrimiento de partículas más pequeñas que el átomo

En 1932 había pruebas experimentales que confirmaban la existencia de partículas más pequeñas que los átomos: los **electrones**, los **protones**, los **neutrones** y los **fotones**. Con ellos se elaboró un modelo de átomo que explicaba la constitución de la materia y la interacción entre la materia y la energía electromagnética. Recuerda el efecto fotoeléctrico o los espectros atómicos.

A partir de esa fecha, el estudio de los rayos cósmicos o la realización de experiencias en las que se hacían chocar protones, neutrones o electrones a gran velocidad, entre sí o contra otros núcleos atómicos, pusieron de manifiesto la existencia de nuevas partículas.

Los neutrinos

En 1930, cuando el físico austriaco Wolfgang E. Pauli (1900-1958) estudiaba la desintegración β en núcleos radiactivos, postuló la existencia de una nueva partícula neutra y de masa muy pequeña para justificar el principio de conservación de la energía en el proceso.



Esta partícula se denominó **neutrino**. Se detectó en 1956 en la Universidad de Berkeley (EE. UU.). Actualmente se crean muchos neutrinos en los aceleradores de partículas y en los reactores nucleares, y se sabe que son muy abundantes en el universo. Hoy sabemos que existen varios tipos de neutrinos. Los que se liberan en la desintegración β son de un tipo denominado antineutrino electrónico. Por eso se representa así:

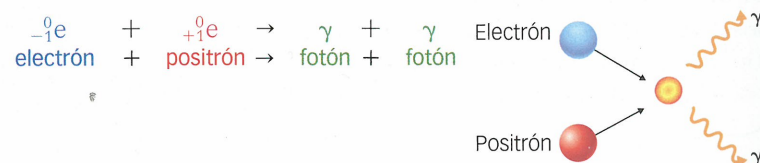
$\bar{\nu}_e$ ← La rayita encima indica que es una antipartícula, es decir, es antimateria.
 ← El subíndice e indica que la partícula aparece asociada al electrón.

La llegada de la antimateria: los positrones

En 1932 el físico estadounidense Carl Anderson (1905-1991) descubrió en los rayos cósmicos una partícula idéntica al electrón, pero con carga positiva. Se la denominó **positrón** (o antielectrón).

El físico teórico británico Paul A. M. Dirac (1902-1984) desarrolló aspectos muy importantes de la mecánica cuántica. Su teoría predecía la existencia de una partícula material idéntica al electrón, pero con carga positiva en vez de negativa. A estas partículas se les llama **antipartículas**, y dan lugar a lo que se conoce como **antimateria**. Por ejemplo, un antiátomo de hidrógeno está formado por un antiprotón y un antielectrón (positrón) girando a su alrededor. El positrón fue la primera antipartícula detectada.

Según las teorías aceptadas ahora, cada partícula tiene su correspondiente antipartícula. Una partícula neutra puede ser su propia antipartícula. Cuando una partícula choca con su antipartícula, ambas se aniquilan convirtiéndose en energía radiante en forma de rayos γ (fotones).



Otras partículas de materia elementales: los muones y los piones

Tras el descubrimiento del positrón, el estudio de los rayos cósmicos permitió identificar nuevas partículas.

En 1936 se descubrió el **muon** (μ), una partícula con carga negativa igual a la del electrón, pero con una masa unas 100 veces mayor. Ninguna teoría predijo esta partícula, y su descubrimiento fue una auténtica sorpresa para los científicos. Es una partícula inestable que se desintegra en unos 2 μ s.

Y en 1947 se descubrió el **pion**, una partícula con tres variantes: neutra (π^0), con carga +1 (π^+) y con carga -1 (π^-). La carga se mide con relación a la carga del electrón. El pion había sido predicho en 1935 por el japonés Hideki Yukawa (1907-1981) para explicar la interacción nuclear fuerte, una interacción que mantiene unidos a protones y neutrones en los núcleos atómicos.

Orden dentro del desorden: la llegada de los quarks

A partir de 1940 y en las décadas siguientes se descubrieron decenas y decenas de partículas y sus correspondientes antipartículas. Los aceleradores de partículas facilitaron los hallazgos. A medida que se establecían sus características, fue tomando cuerpo la idea de que podían ser combinación de otras partículas más elementales, igual que los diversos núcleos atómicos son combinaciones de protones y neutrones.

Así, en 1964 Murray Gell-Mann (n. 1929) y, de manera independiente, George Zweig (n. 1937) propusieron una teoría que explicaba la existencia de muchas de las partículas conocidas hasta ese momento como combinación de partículas más elementales denominadas **quarks**.

En la década de 1970 algunos experimentos, en los que electrones con alta energía bombardeaban protones y neutrones (► Figura 11.3) confirmaron que los nucleones no eran partículas fundamentales. En su interior había tres partículas más pequeñas con carga eléctrica fraccionaria: eran los quarks predichos por Gell-Mann y Zweig. Según Gell-Mann, bastaban tres quarks, y sus correspondientes antiquarks, para explicar la variedad de partículas y antipartículas conocidas hasta el momento. Se les denominó **arriba** (*up*, u), **abajo** (*down*, d) y **extraño** (*strange*, s).

El quark arriba tiene **carga positiva**, +2/3, mientras que el quark abajo tiene **carga negativa**, -1/3. Combinándolos se pueden formar el protón y el neutrón. Y combinando los antiquarks antiarriba (u) y antiabajo (d) se pueden formar el antiprotón y el antineutrón.

Posteriormente se han añadido otros tres quarks para explicar la existencia de todas las partículas conocidas. Se denominan **encanto** (*charm*, c), **cima** (*top*, t) y **fondo** (*bottom*, b). Todos ellos se han descubierto en experimentos con partículas realizados a alta energía.

Los quarks tienen una peculiaridad: **no se observan aislados en la naturaleza**, sino que siempre aparecen unidos en grupos de dos, tres o más.

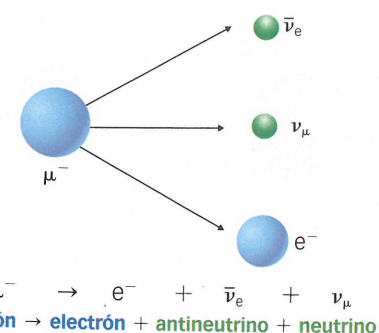


Figura 11.2. El muon se desintegra al cabo de unos dos microsegundos. Inicialmente se pensó que el muon era la partícula predicha por Yukawa, pues su masa era similar al valor predicho. Sin embargo, estudios posteriores confirmaron que los muones no intervienen en los procesos nucleares.

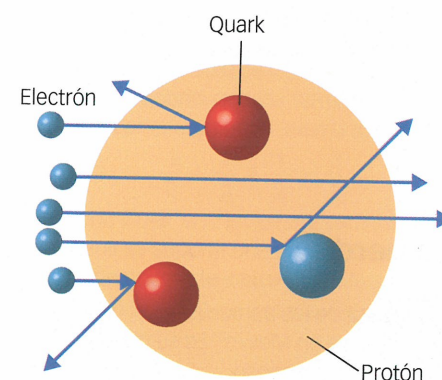


Figura 11.3. El bombardeo de protones y neutrones con electrones demostró la existencia de los **quarks**.

Protón	Neutrón
Carga total: +2/3 + 2/3 - 1/3 = +1	Carga total: -1/3 - 1/3 + 2/3 = 0
Antiprotón	Antineutrón
Carga total: -2/3 - 2/3 + 1/3 = -1	Carga total: +1/3 + 1/3 - 2/3 = 0

Figura 11.1. La **tomografía por emisión de positrones** (PET) es una técnica de diagnóstico médico para la detección y seguimiento de tumores cancerígenos.

Por vía endovenosa, se administra al paciente un radiofármaco (contraste) que se fija especialmente en las células tumorales. En su desintegración emite positrones que, al entrar en contacto con un electrón de la corteza de un átomo del paciente, se aniquilan y se generan dos fotones. El aparato lleva unos detectores de los fotones y elabora una imagen del tumor a partir de todos los fotones que detecta.

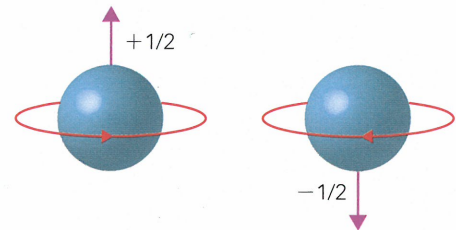


Figura 11.4. El **espín** se suele representar por una flecha hacia arriba, para indicar que la partícula gira en un sentido, o hacia abajo, para indicar que gira en el sentido contrario. Imagina el caso de una partícula que puede girar en torno a sí misma en un sentido o en el contrario. Si consideramos dos partículas idénticas (por ejemplo, dos electrones o dos quarks up), tendrán espín contrario ($+1/2$, $-1/2$) si giran en sentidos opuestos. El espín, o momento angular intrínseco, es una propiedad física característica de cada partícula, como la masa o la carga.

Recuerda

La **masa** de las partículas se expresa en MeV/c^2 . Es su masa relativista en reposo.

La **carga** de las partículas está referida a la carga del electrón: $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

El **espín** se expresa en unidades $\hbar/2\pi$: $1,06 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$.

Las partículas se pueden agrupar en familias:

- **Familia 1.** Partículas que forman la materia conocida.
- **Familia 2.** Partículas de mayor energía que se detectan en la radiación cósmica o se generan en los aceleradores de partículas.
- **Familia 3.** Partículas de muy alta energía que existieron en los primeros momentos de vida del universo, tras el *big bang*.

1.2. Propiedades de las partículas: masa, carga y espín

A medida que se fueron descubriendo las distintas partículas, se determinaron sus propiedades características, como la masa y la carga eléctrica. Cada partícula tiene, además, otra propiedad característica, denominada momento angular intrínseco o **espín**. Desde un punto de vista clásico, se determina el momento angular para caracterizar el movimiento de una partícula en rotación (recuerda la página de repaso). Así se puede obtener el momento angular orbital del electrón que gira en torno al núcleo del átomo.

En 1922 los físicos alemanes Otto Stern (1888-1969) y Walther Gerlach (1889-1979) realizaron una experiencia que demostró que los electrones podían desviarse en dos haces al sentir un campo magnético. Es decir, tienen una propiedad, que llamamos espín, que puede adoptar dos valores. En unidades $\hbar/2\pi$, el espín del electrón puede adoptar los valores $1/2$ o $-1/2$. Es decir, a nivel cuántico existe un momento angular intrínseco o espín que podemos representar mediante el giro de una partícula en torno a sí misma.

El comportamiento magnético de las partículas está relacionado con su espín.

1.3. Partículas elementales: leptones y quarks

Actualmente clasificamos las partículas elementales en dos tipos:

- **Leptones:** se observan como partículas independientes. Ejemplo: el electrón.
- **Quarks:** no se observan como partículas independientes. Ejemplo: el quark arriba.

Son las partículas más básicas que forman la materia. Todas las partículas que se detectan están formadas por una o más de estas partículas elementales.

Leptones						
Familia	Nombre	Símbolo	Masa	Carga	Espín	Antipartícula
1	Electrón	e^-	0,511	-1	1/2	e^+
	Neutrino electrónico	ν_e	≈ 0	0	1/2	$\bar{\nu}_e$
2	Muon	μ^-	106,7	-1	1/2	μ^+
	Neutrino del muon	ν_μ	≈ 0	0	1/2	$\bar{\nu}_\mu$
3	Partícula tau	τ^-	1777	-1	1/2	τ^+
	Neutrino del tau	ν_τ	≈ 0	0	1/2	$\bar{\nu}_\tau$

Quarks						
Familia	Nombre	Símbolo	Masa	Carga	Espín	Antipartícula
1	Up (arriba)	u	2,3	$+2/3$	1/2	$\bar{u}$
	Down (abajo)	d	4,8	$-1/3$	1/2	$\bar{d}$
2	Charm (encanto)	c	1275	$+2/3$	1/2	$\bar{c}$
	Strange (extraño)	s	95	$-1/3$	1/2	$\bar{s}$
3	Top (cima)	t	173 070	$+2/3$	1/2	$\bar{t}$
	Bottom (fondo)	b	4180	$-1/3$	1/2	$\bar{b}$

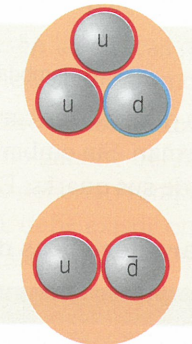
Hay seis leptones y seis quarks diferentes. Se llama **sabor** a la propiedad responsable de esta diferencia. Se dice que hay seis sabores de leptones y seis sabores de quarks.

1.4. Los hadrones

Los quarks no se han observado como partículas independientes. Las agrupaciones de varios quarks se llaman **hadrones**. Las características (masa, carga eléctrica, etc.) de cada hadrón dependen de los quarks que lo integran.

Existen dos tipos de hadrones:

- **Bariones:** son combinaciones de tres quarks o de tres antiquarks. Ejemplo: el protón, formado por dos quarks u y un quark d .
- **Mesones:** son combinaciones de dos quarks: un quark y un antiquark. Ejemplo: el pión π^+ , formado por un quark u y un antiquark $\bar{d}$.



El «color» de los quarks

Los quarks, como los electrones, tienen espín $1/2$. Según las leyes de la física cuántica, todas las partículas con espín semientero deben cumplir el principio de exclusión de Pauli. Es decir, en un sistema físico no puede haber dos partículas en el mismo estado. Observa los bariones Δ^{++} y Δ^- que se muestran en la figura 11.6. Ambos están formados por tres quarks iguales. En ambos casos, el espín del barión es $3/2$; por tanto, todos los quarks tienen su momento angular intrínseco idéntico. Para evitar la violación del principio de exclusión de Pauli, los tres quarks u del Δ^{++} y los tres quark d del Δ^- se deben diferenciar en otra propiedad.

En 1964 Oscar W. Greenberg (n. 1932) propuso que los quarks tenían una nueva propiedad, llamada **carga de color**. Se trata de una propiedad análoga a la carga eléctrica, pero que puede ser de tres tipos diferentes. Los tipos de esta carga de **color** se identificaron con los colores primarios: **rojo**, **verde** y **azul**. Obviamente, esto es una analogía; no se trata de color real. Los antiquarks tienen anticolores (antirrojo, antiverde o antiazul). La existencia de tres tipos de carga de color se ha confirmado experimentalmente.

Así pues, cada sabor de quark se puede presentar en tres colores diferentes. Por eso existen $3 \cdot 6 = 18$ quarks y sus correspondientes antiquarks.

La teoría del color para los quarks señala que **solo son posibles las combinaciones de quarks que dan como resultado una partícula «sin color»**.

- En los **bariones**, un quark debe tener carga de color rojo, otro carga de color verde y otro carga de color azul. En el caso de antipartículas debe haber un antiquark con carga de color antirrojo, otro con carga antiverde y otro con carga antiazul. Los bariones son combinaciones de tres quarks o tres antiquarks de colores «que suman blanco» cuando se superponen.
- Los **mesones** son combinaciones de un quark y un antiquark con el anticolor correspondiente; su suma da color blanco. Ejemplos:

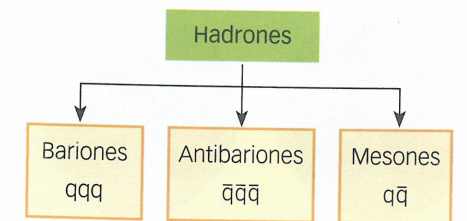
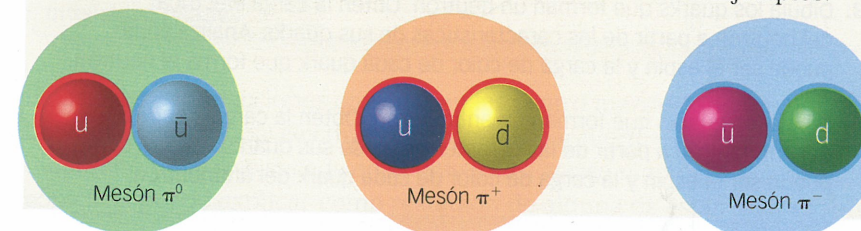


Figura 11.5. Hadrones.

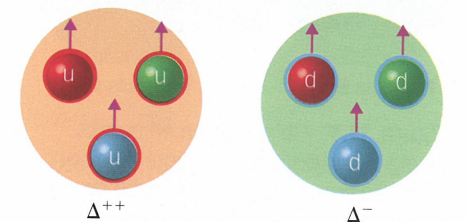


Figura 11.6. El barión Δ^{++} y el Δ^- tienen espín $3/2$. Esto solo se puede explicar si los tres quarks que los forman tienen el espín orientado en el mismo sentido:

$$\frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = \frac{3}{2}$$

Para no violar el principio de exclusión de Pauli se supone que existen tres tipos de **carga de color** que diferencian los quarks dentro de cada barión.

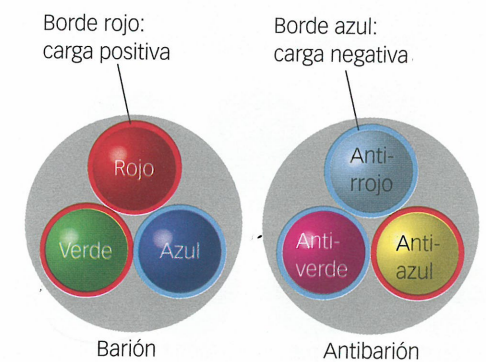


Figura 11.7. Carga de color en un **barión** y en un **antibarión**.

Figura 11.8. Carga de **color** en mesones.

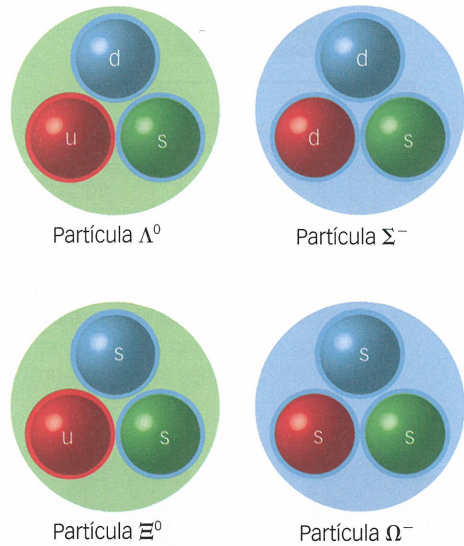


Figura 11.9. Composición en quarks de algunos **bariones**. La carga de color no es fija para cada quark. Al cabo de cierto tiempo el color de cada quark cambia, pero la suma de todos ellos siempre debe dar blanco.

Recuerda

La **masa** de las partículas se expresa en MeV/c^2 . Es su masa relativista en reposo.

La **carga** de las partículas está referida a la carga del electrón: $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

El **espín** se expresa en unidades $\hbar/2\pi$: $1,06 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$.

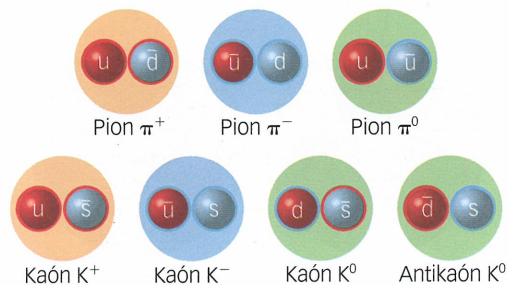


Figura 11.10. Composición en quarks y antiquarks de algunos **mesones**.

Recuerda

Cada partícula tiene su antipartícula, con carga eléctrica opuesta. Algunas partículas neutras, como el fotón, son su propia antipartícula.

En otros casos, como el del neutrón, la antipartícula de la partícula neutra es diferente a la partícula.

Ejemplos de hadrones

Los hadrones más comunes son el protón y el neutrón. Son los bariones más estables y están en el núcleo de los átomos, por eso se llaman **nucleones**.

Los demás bariones se llaman **hiperones**. Tienen una vida media muy pequeña, ya que se desintegran rápidamente en otras partículas. Por ejemplo:



En general, las características de un hadrón resultan de los quarks que los forman. Sin embargo, la masa del protón y el neutrón es mucho mayor que la de sus quarks. Esta cuestión se abordará al final de este tema.

Características de algunos bariones. Espín semientero

Bariones (combinaciones de tres quarks)						
Nombre	Símbolo	Quarks	Masa	Carga	Espín	Antipartícula
Protón	p	uud	938	+1	1/2	$\bar{p}$
Neutrón	n	udd	940	0	1/2	$\bar{n}$
Lambda	Λ^0	uds	1115	0	1/2	$\bar{\Lambda}^0$
Delta	Δ^{++}	uuu	1232	+2	3/2	$\bar{\Delta}^{--}$
	Δ^-	ddd	1232	-1	3/2	$\bar{\Delta}^+$
Sigma	Σ^+	uus	1190	+1	1/2	$\bar{\Sigma}^-$
	Σ^0	uds	1193	0	1/2	$\bar{\Sigma}^0$
	Σ^-	dds	1197	-1	1/2	$\bar{\Sigma}^+$
Xi	Ξ^0	uss	1315	0	1/2	$\bar{\Xi}^0$
	Ξ^-	dss	1321	-1	1/2	$\bar{\Xi}^+$
Omega	Ω^-	sss	1672	-1	3/2	$\bar{\Omega}^0$

Características de algunos mesones. Espín entero

Mesones (combinaciones de quark + antiquark)						
Nombre	Símbolo	Quarks	Masa	Carga	Espín	Antipartícula
Pion	π^+	$u\bar{d}$	140	+1	0	π^-
	π^0	$u\bar{u} + d\bar{d}$	135	0	0	El mismo
Kaón	K^+	$u\bar{s}$	494	+1	0	K^-
	K^0	$d\bar{s} + \bar{d}s$	498	0	0	$\bar{K}^0$
Phi	φ	$s\bar{s}$	1020	0	1	El mismo
J/Psi	J/ψ	$c\bar{c}$	3097	0	1	El mismo
Upsilon	Y	$b\bar{b}$	9460	0	1	El mismo

ACTIVIDADES

- Dibuja los quarks que forman un neutrón. Obtén la carga eléctrica del neutrón a partir de las características de sus quarks. Analiza cómo puede ser el espín y la carga de color de cada quark que forma el neutrón.
- Dibuja los quarks que forman un antineutrón. Obtén la carga eléctrica del antineutrón a partir de las características de sus quarks. Analiza cómo puede ser el espín y la carga de color de cada quark del antineutrón.

2 Las interacciones fundamentales

2.1. Justificación de otras interacciones

Si las interacciones gravitatoria y electromagnética fuesen las únicas del universo, sería imposible explicar hechos como la existencia de los átomos.

Con la excepción de los átomos de hidrógeno, en el núcleo de los átomos coinciden varias cargas positivas: los protones. El pequeño tamaño del núcleo determina unas fuerzas de repulsión tan intensas que deberían romper todos los átomos con más de un protón. Como no es así, debe existir otra interacción, más fuerte que la electromagnética, que mantiene unidos a los protones y neutrones del núcleo. Se denomina **interacción nuclear fuerte**.

Por otra parte, al estudiar la desintegración radiactiva β se puso de manifiesto una nueva interacción, de menor intensidad que la interacción nuclear fuerte: la **interacción nuclear débil**.

2.2. Las interacciones en la naturaleza

Analicemos las interacciones que existen entre las partículas y en los cuerpos que forman. Un dato importante es el tamaño de las partículas:

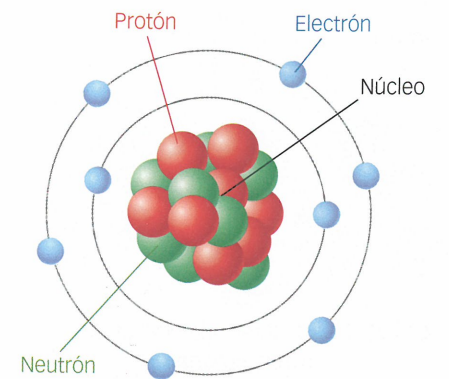
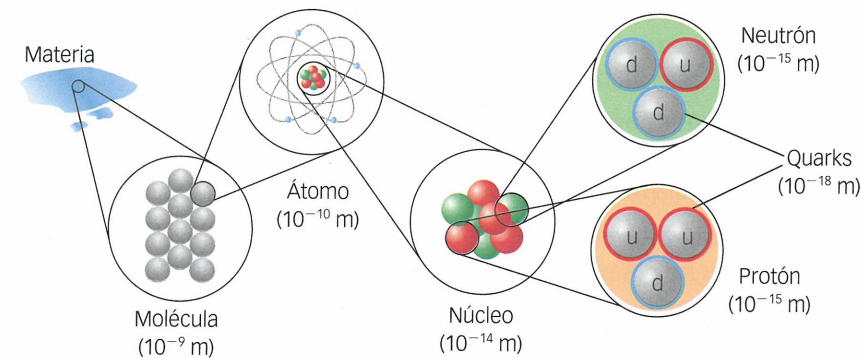


Figura 11.11. Si solo existiesen las interacciones gravitatoria y electrostática, los átomos no existirían.

Figura 11.12. Todos los fenómenos que se producen en el universo (visible y no visible) se deben a interacciones entre las partículas que lo forman. Estas interacciones se manifiestan mediante una fuerza.

Las interacciones se pueden agrupar en cuatro tipos básicos denominadas **interacciones fundamentales**:

	Interacción gravitatoria	Interacción electromagnética	Interacción nuclear débil	Interacción nuclear fuerte
Característica	Atracción entre masas. 	Acción entre cargas (atracción o repulsión). 	Se pone de manifiesto cuando un quark o un leptón cambian de sabor: • Protón → neutrón. • Electrón → neutrino del electrón.	Atracción entre quarks (fundamental). Atracción entre hadrones (residual). Mantiene unido el núcleo atómico.
Partículas elementales sobre las que actúa	Quarks y leptones.	Quarks y leptones (salvo los neutrinos).	Quarks y leptones.	Quarks.
Alcance	Infinito. Disminuye con el cuadrado de la distancia entre los cuerpos o partículas.	10 ⁻¹⁸ m; 0,1 % del diámetro de un protón.	10 ⁻¹⁵ m. Diámetro del núcleo atómico medio.	
Intensidad relativa	10 ⁻³⁸	10 ⁻²	10 ⁻⁶	1

Estas cuatro interacciones constituyen las cuatro fuerzas fundamentales del universo: gravitatoria, electromagnética, nuclear fuerte y nuclear débil. Cualquier fenómeno que suceda en el universo a escala macroscópica o microscópica se puede explicar como resultado de alguna de estas interacciones.

2.3. Las interacciones nucleares

Las interacciones nucleares son muy importantes, pero solo a distancias muy cortas. A distancias mayores que el núcleo, su intensidad decae rápidamente y entonces cobra importancia la interacción electromagnética.

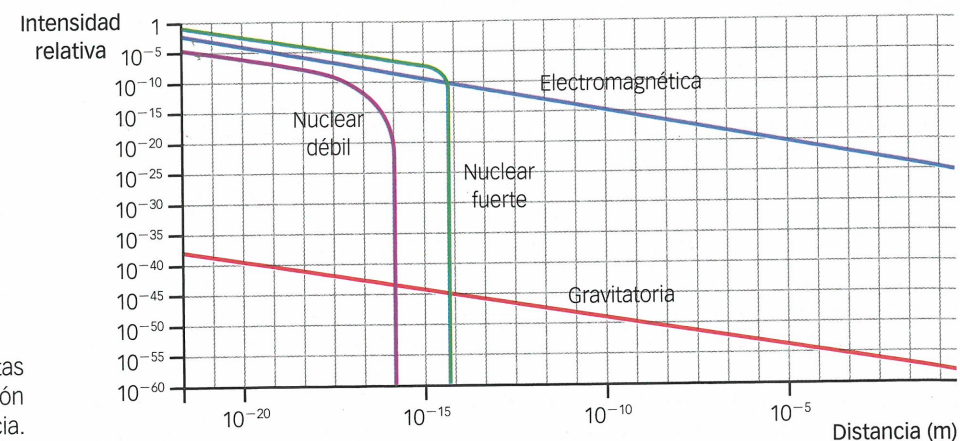


Figura 11.13. Intensidad de las distintas interacciones y su variación con la distancia.

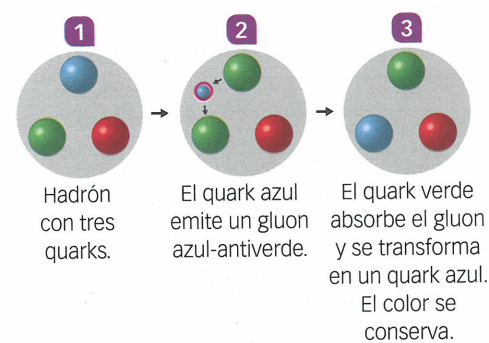


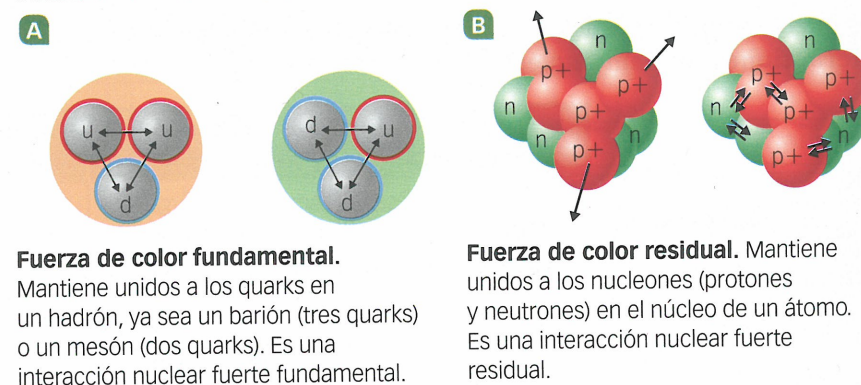
Figura 11.14. Fuerza de color. El gluón es la partícula mediadora que transmite esta fuerza.

Puesto que existen los núcleos de los átomos, los nucleones están unidos por una fuerza fuerte. Esta fuerza:

- Debe ser de **carácter atractivo** en promedio, puesto que compensa la repulsión entre los protones.
- Debe ser de **elevada intensidad**, puesto que es capaz de vencer la fuerte repulsión electrostática.
- Debe ser de **muy corto alcance**, puesto que en una molécula la fuerza existente entre los núcleos de los átomos que la forman es aproximadamente igual a la fuerza electrostática.

Pero los protones y los neutrones son bariones formados por tres quarks. Debe existir una fuerza nuclear fuerte que los mantenga unidos.

La fuerza nuclear fuerte, también denominada fuerza de color, se puede considerar a dos niveles:



Fuerza de color fundamental. Mantiene unidos a los quarks en un hadrón, ya sea un barión (tres quarks) o un mesón (dos quarks). Es una interacción nuclear fuerte fundamental.

Fuerza de color residual. Mantiene unidos a los nucleones (protones y neutrones) en el núcleo de un átomo. Es una interacción nuclear fuerte residual.

Observa

La diferencia entre la interacción nuclear fuerte fundamental y la residual es, desde el punto de vista de las fuerzas de color, similar a la diferencia entre la fuerza electrostática que mantiene unidos a los electrones a sus átomos (fuerza fundamental) y la que mantiene unidos a los átomos mediante un enlace covalente (fuerza residual).

ACTIVIDADES

5. Teniendo en cuenta las distancias que se expresan más abajo, razona cuáles son las interacciones más importantes que tienen lugar:
- Entre dos moléculas de agua.
 - Dentro de una molécula de agua.
 - Dentro del átomo de O.
 - Dentro del núcleo del átomo de O.
- Datos: distancia entre los centros de dos moléculas de agua: $3 \cdot 10^{-10}$ m; diámetros: molécula de agua $\rightarrow 1,5 \cdot 10^{-10}$ m; átomo de O $\rightarrow 10^{-10}$ m; núcleo $\rightarrow 10^{-15}$ m; protón $\rightarrow 10^{-17}$ m.

3 El modelo estándar

3.1. Fermiones y bosones

El modelo estándar de la física es una teoría sobre la naturaleza de la materia desarrollada en la década de 1970. Identifica las partículas básicas que forman la materia y especifica cómo interactúan. Siempre que se produce una interacción se intercambia una partícula entre las entidades implicadas.

- Las partículas que forman la materia se denominan **fermiones** en honor de Enrico Fermi (1901-1954). Todas tienen espín semientero: $1/2, 3/2, \dots$. Son fermiones todas las partículas elementales de materia, es decir, los **quarks** y los **leptones**. También son fermiones los bariones (combinaciones de tres quarks).
- Las partículas mediadoras de las fuerzas que se manifiestan en cada interacción se llaman **bosones** en honor de Satyendra N. Bose (1894-1974). Tienen espín entero: $0, 1, 2, \dots$. También son bosones los mesones (combinaciones de dos quarks).

Cada interacción tiene uno o más bosones mediadores.

- El **fotón** es la partícula mediadora de la interacción electromagnética. Tiene masa nula.
- Las partículas mediadoras de la interacción nuclear débil se denominan **bosones intermedios**: W^+, W^- y Z , y tienen una masa mucho mayor que la del protón.
- Los mediadores de la interacción nuclear fuerte fundamental se denominan **gluones**. Existen ocho gluones, todos con masa nula.
- El hipotético mediador no detectado de la interacción gravitatoria se denomina **gravitón**. Las predicciones teóricas indican que es una partícula elemental con las características que se indican en la tabla.

Interacción	Mediador	Masa	Carga	Espín
Electromagnética	Fotón (γ)	≈ 0	0	1
Nuclear débil	W^+, W^-	$80,4 \text{ GeV}/c^2$	$+1, -1$	1
	Z^0	$91,2 \text{ GeV}/c^2$	0	1
Nuclear fuerte	Fundamental: Gluón (8 tipos)	≈ 0	0	1
	Residual: Mesones	Varios	Varios	Varios
Gravitatoria	Gravitón	No detectado	0 (supuesta)	2 (supuesto)

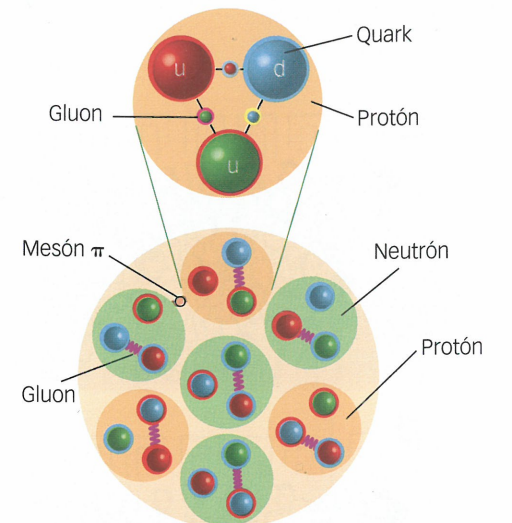


Figura 11.15. Partículas afectadas por las dos modalidades de **interacción fuerte**, mostrando la partícula mediadora correspondiente (gluón y mesón π).

Las partículas mediadoras se consideran **virtuales**, a diferencia de las partículas que forman la materia, que son partículas reales.

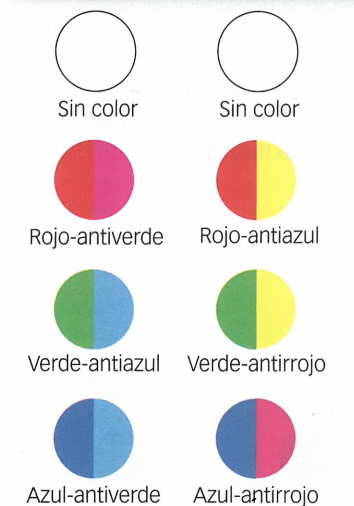


Figura 11.16. Los 8 gluones. Dos son incolores, y seis, coloreados.

De las tres posibles combinaciones incolores, una es combinación lineal de las otras dos. Solo hay dos combinaciones incolores independientes.

ACTIVIDADES

6. Analiza cuáles de las siguientes partículas son fermiones y cuáles son bosones:
- Muon.
 - Neutrón.
 - Z.
 - Sigma.
 - Quark arriba (u).
 - Pion.
 - Neutrino.
 - Gluon.
 - Fotón.
 - Quark fondo (b).
7. Razona cuál es el tipo de partícula de intercambio que aparece o es responsable de los siguientes fenómenos:
- Estabilidad del núcleo.
 - Efecto fotoeléctrico.
 - Estabilidad del protón.
 - Emisión de radiación beta por un núcleo atómico.

3.2. El bosón de Higgs

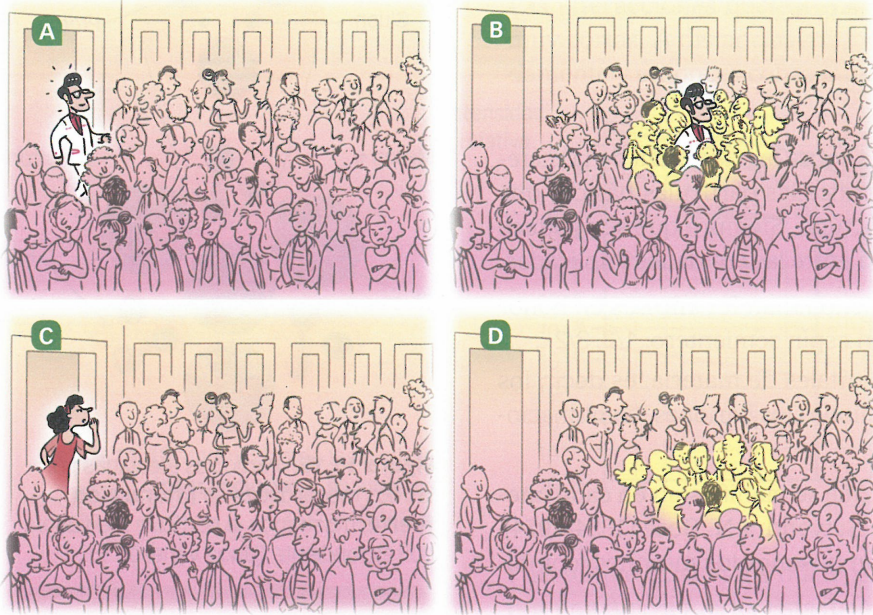


Figura 11.17. El campo de Higgs es «análogo» a una sala abarrotada. Una partícula se identifica con alguien que desea cruzarla (A). Cuanto más famosa es la persona (más masa), más admiradores acumula y es más lenta cuando se mueve (B). Si un rumor atraviesa la sala (C), también se acumulan personas y esta acumulación se propaga como una partícula masiva (bosón de Higgs).

La partícula responsable de esta interacción de las partículas con el campo de Higgs se denomina **bosón de Higgs**.

Así pues, el bosón de Higgs es una partícula elemental que justifica la existencia de masa en las partículas elementales. El propio bosón de Higgs tiene una masa de $125 \text{ GeV}/c^2$, que surge cuando se forman «grumos», o perturbaciones locales en el campo de Higgs.

Durante mucho tiempo el bosón de Higgs fue la única partícula del modelo estándar que faltaba por detectar, ya que no existían instalaciones capaces de realizar experimentos con la suficiente energía para producirla.

Pero en 2012 el CERN anunció que en un experimento llevado a cabo en su Gran Colisionador de Hadrones (LHC) se había detectado una partícula de características compatibles con las del hipotético bosón de Higgs. Nuevos experimentos realizados en 2013 confirmaron el hallazgo, lo que determinó la concesión del premio Nobel de Física en 2013 a P. Higgs y a F. Englert (R. Brout ya había fallecido).

Con la aparición del bosón de Higgs se alcanza un total de 13 bosones mediadores de las interacciones. Pero no se descarta que existan más bosones asociados al campo de Higgs.

ACTIVIDADES

8. El esquema del margen muestra todas las partículas elementales del modelo estándar y la relación entre ellas. Observa el gráfico y responde:
- ¿Por qué no hay ninguna línea que enlace el bosón de Higgs con los fotones y los gluones?
 - ¿Por qué hay un bucle en torno al bosón de Higgs? ¿Qué significa?
 - ¿Por qué hay un bucle en torno a los gluones? ¿Qué significa?
 - ¿Por qué no hay ningún bucle en torno a los leptones ni en torno a los quarks?
 - ¿Por qué no hay ningún enlace entre los gluones y los leptones?

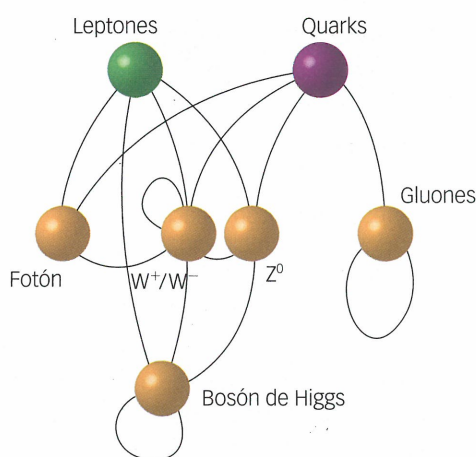


Figura 11.18. Los fermiones y bosones que conforman el modelo estándar. El bosón de Higgs interactúa con todas aquellas partículas con masa. Si no existiera el campo de Higgs, las partículas no tendrían masa.

3.3. El mapa de las partículas

El modelo estándar llegó a configurar el mapa de todas las partículas elementales existentes. Comprende:

- Las partículas que forman la materia, partículas reales.
- Las partículas que forman los mediadores de las interacciones, partículas virtuales.
- El bosón de Higgs.

Además de las características de masa, carga eléctrica y espín, las partículas pueden tener una carga débil y/o una carga fuerte (carga de color) que les harán susceptibles o no de sufrir interacción nuclear débil o fuerte.

Cada partícula tiene su antipartícula. Algunas partículas, como el fotón, son su propia antipartícula.

Partículas	
QUARKS	$2,3 \text{ MeV}/c^2$ $2/3$ $1/2$ u Arriba
	$1,275 \text{ GeV}/c^2$ $2/3$ $1/2$ c Encanto
	$173,07 \text{ GeV}/c^2$ $2/3$ $1/2$ t Cima
	$4,8 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ d Abajo
	$95 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ s Extraño
	$4,18 \text{ GeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ b Fondo
LEPTONES	0 0 1 g Gluon
	$126 \text{ GeV}/c^2$ 0 0 H Bosón de Higgs
	0 0 1 γ Fotón
	$0,511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$ e Electrón
	$106,7 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$ μ Muon
	$1777 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$ τ Tau
BOSONES GAUGE	$91,2 \text{ GeV}/c^2$ 0 1 Z Bosón Z
	$80,4 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 1 W Bosón W
	$<2,2 \text{ eV}/c^2$ 0 $1/2$ ν_e Neutrino del electrón
	$<0,17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $1/2$ ν_μ Neutrino del muon
	$<15,5 \text{ MeV}/c^2$ 0 $1/2$ ν_τ Neutrino del tau

El modelo estándar identifica las siguientes partículas elementales.

Partículas que forman la materia

- Leptones: 6 sabores.
- Quarks: 6 sabores $\cdot$ 3 color = 18.

En total: **24 partículas + 24 antipartículas**.

Todas las partículas existentes son partículas elementales o resultan de la combinación de dos o más partículas elementales.

Partículas de intercambio transmisoras de las interacciones

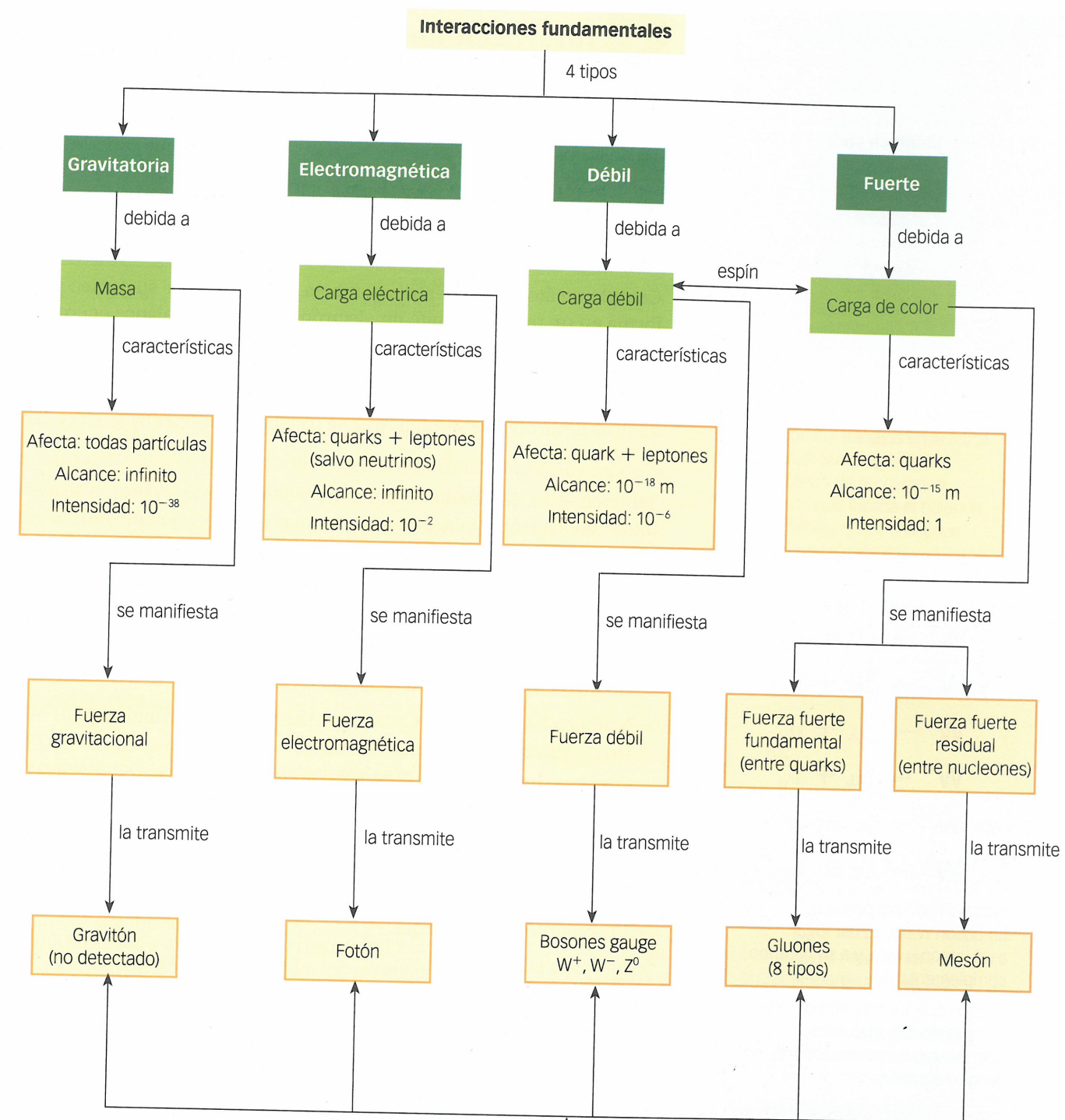
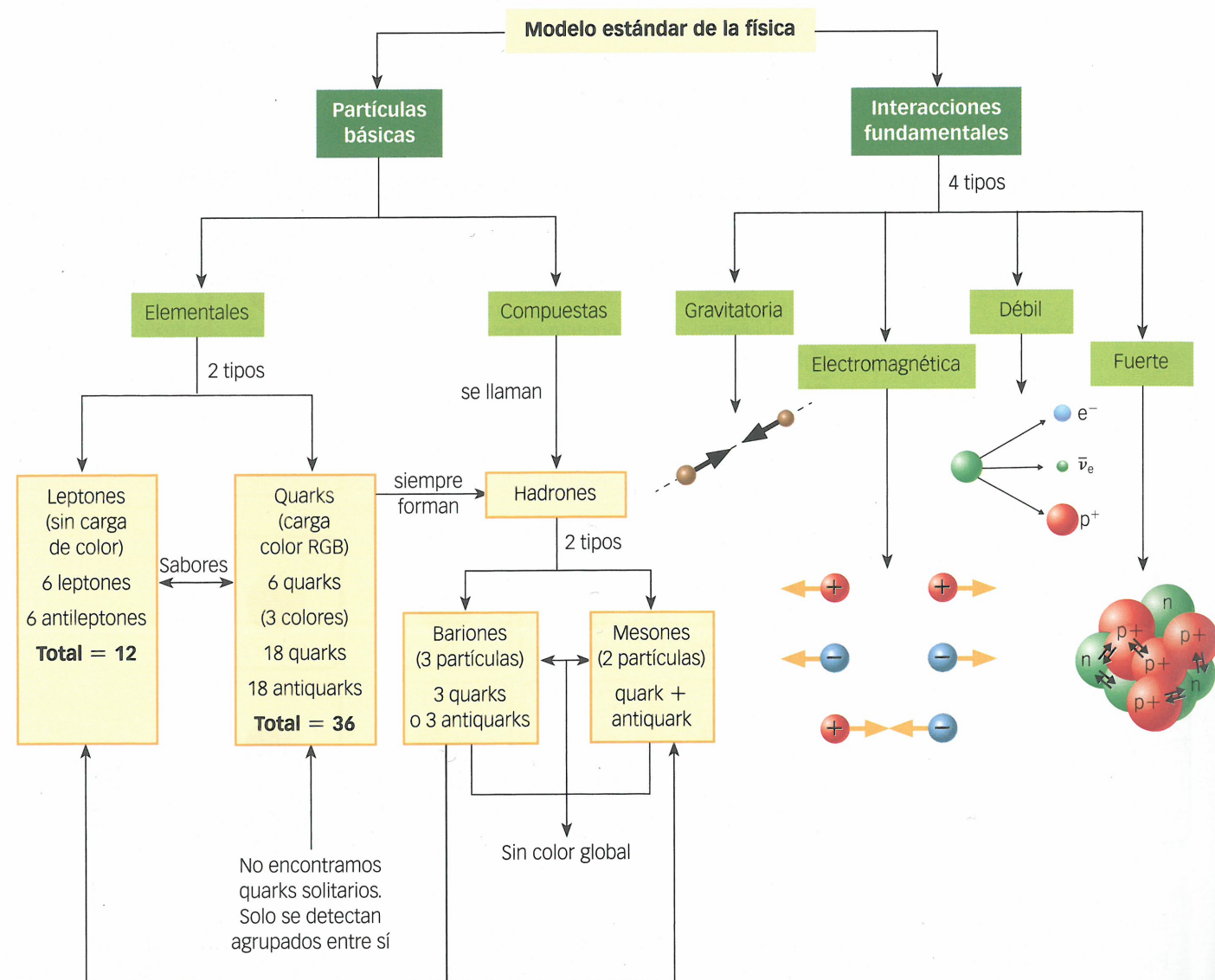
- 8 gluones.
- 3 bosones gauge: W^+ , W^- , Z.
- 1 fotón.
- 1 bosón de Higgs.

En total: $8 + 1 + 3 + 1 = 13$ **partículas de intercambio**.

3.4. Resumen del modelo estándar

El cuadro siguiente resume el modelo estándar de la física. En él se recogen todas las partículas básicas (elementales y compuestas) que forman la materia.

Especifica también las interacciones fundamentales de la naturaleza, deteniéndose en la propiedad de la materia causante de la interacción, la fuerza mediante la que se manifiesta y la partícula que la transmite.



Forman todas las partículas reales de la materia

Interactúan cambiando

Interactúan cambiando

Forman partículas virtuales o de intercambio

Bosón de Higgs (1 o más)

Partícula de intercambio con el campo de Higgs. Responsable de la masa de las partículas elementales

La **electrodinámica cuántica (EDQ)** estudia las interacciones entre las partículas con carga eléctrica mediadas por fotones.

La **cromodinámica cuántica (CDQ)** estudia las interacciones entre los quarks mediadas por gluones.

Con las dos teorías se pueden describir todas las interacciones de las partículas que se observan experimentalmente.

4 Interacciones entre partículas

El modelo estándar de la física se fue configurando como resultado del estudio de las partículas materiales y las transformaciones que experimentaban. Analizando la masa, la carga y otras propiedades de las partículas presentes en una determinada «reacción», se pudo concluir que debían existir nuevas partículas, que luego se detectaron y caracterizaron. Veamos cómo se pudo deducir la existencia del neutrino del estudio de la desintegración beta.

Cuando un átomo emite radiación beta, un neutrón de su núcleo se transforma en un protón y emite un electrón. Al hacer el balance energético de las partículas se comprobó que la energía del electrón saliente era menor de la esperada. Esto llevó a pensar que se liberaba una partícula adicional, de masa muy pequeña y sin carga, a la que se llamó neutrino. Posteriores análisis llevaron a determinar que se trataba del antineutrino electrónico.



También se ha detectado decaimiento beta en el que un protón se transforma en un neutrón, emitiendo además un positrón y un neutrino electrónico.



Para facilitar el balance de las partículas que intervienen en un proceso se establecieron dos números cuánticos:

- **Número leptónico, L.** Cada leptón tiene $L = 1$. Un antileptón, $L = -1$. Un quark, que no es un leptón, tiene $L = 0$.
- **Número bariónico, B.** Cada quark tiene $B = 1/3$. Un antiquark, $B = -1/3$. Un leptón, que no es un quark, $B = 0$.
Observa que un barión (3 quarks) tendrá $B = 1/3 + 1/3 + 1/3 = 1$; y un antibarión (3 antiquarks), $B = -1/3 - 1/3 - 1/3 = -1$.

Leyes de conservación

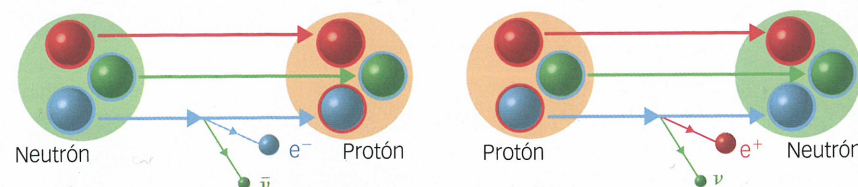
Para que sea posible una interacción entre partículas deben conservarse:

- El conjunto masa-energía.
- El número bariónico.
- La carga eléctrica.
- El número leptónico.

La conservación del número leptónico determina que, en el decaimiento beta del neutrón [1], además del electrón se obtenga el antineutrino. Y en el decaimiento beta del protón [2], además del positrón se obtenga el neutrino.

4.1. La interacción y la partícula de intercambio

Se puede relacionar una interacción con la partícula de intercambio responsable de la misma. Las desintegraciones beta descritas resultan de la interacción débil, y la partícula mediadora es un bosón.



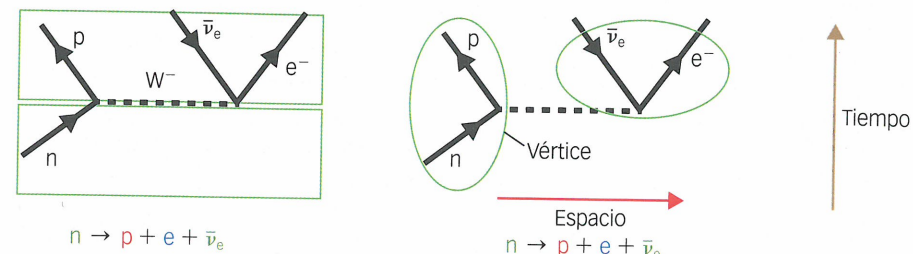
En el decaimiento del neutrón [1] se emite un bosón W^- , el cual produce el electrón y el antineutrino.

En el decaimiento de un protón ligado a un núcleo [2] se emite un bosón W^+ , el cual produce el positrón y el neutrino.

Diagramas de Feynman

Los diagramas de Feynman permiten describir las interacciones entre partículas junto con las fuerzas de intercambio que intervienen.

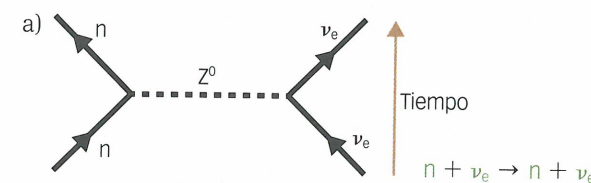
La representación de la interacción [1] descrita en la página anterior es:



- En la parte inferior se escriben las **partículas iniciales**. En este caso, solo es el neutrón. Si el neutrón interaccionase con otra partícula (por ejemplo, otro neutrón o un protón), se escribiría en la parte inferior derecha.
- En la parte superior se escriben las **partículas finales**.
- La línea discontinua u ondulada indica la **partícula mediadora** de la interacción: un fotón, un bosón intermedio o un gluón.
- Cuando intervienen partículas, el **sentido de la flecha** es entrante en las partículas iniciales y es saliente en las partículas finales. Para una antipartícula, el sentido de la flecha es el opuesto en cada caso.
- Las partículas que se relacionan **en cada vértice** deben conservar la carga, el número bariónico y el número leptónico.

EJEMPLO RESUELTO

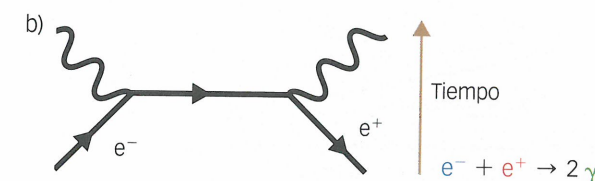
2 Describe la interacción que se representa en los siguientes diagramas de Feynman y explica con qué tipo de interacción fundamental se corresponde:



Un neutrón interacciona con un neutrino, intercambiando un bosón Z^0 , para dar un neutrón y un neutrino en distinto estado energético.

No hay variación en la carga de la partícula inicial y final en cada vértice. Por tanto, la partícula de intercambio debe ser un bosón que no tenga carga, es decir, Z^0 .

Se trata de una interacción débil, puesto que la partícula de intercambio es un bosón Z^0 .



Una de las partículas iniciales se representa con la flecha en sentido entrante (partícula) y la otra, en sentido saliente (antipartícula).

El diagrama representa un electrón que interacciona con un positrón y se liberan dos fotones. Representa el proceso de aniquilamiento electrón-positrón.

Es una interacción electromagnética, ya que interaccionan partículas cargadas. La partícula de intercambio son fotones.

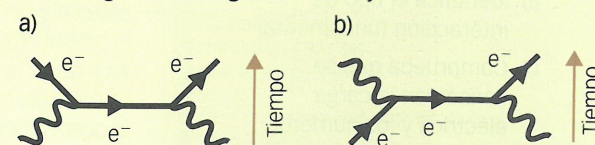
ACTIVIDADES

9. Comprueba que en la desintegración beta del neutrón se conserva:
- La carga eléctrica.
 - El número leptónico.
 - El número bariónico.

ACTIVIDADES

10. Escribe el diagrama de Feynman correspondiente a los siguientes procesos:
- Un protón decae dando un positrón y un neutrino electrónico.
 - Un electrón y un positrón intercambian un fotón dando un electrón y un positrón en otro estado energético.

11. Describe la interacción que se representa en los siguientes diagramas de Feynman:



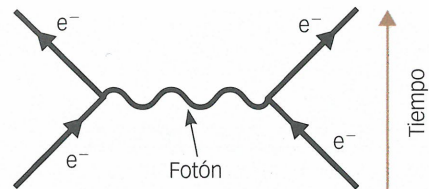


Figura 11.20. Diagrama de Feynman correspondiente a una interacción electromagnética. Dos electrones interactúan intercambiando un fotón y se repelen el uno al otro.

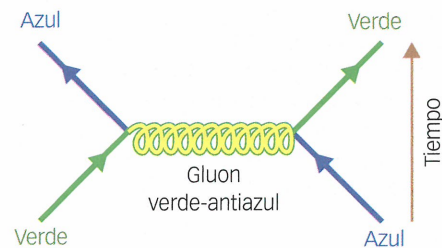
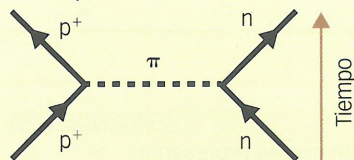


Figura 11.21. El quark verde pierde su color verde al emitir el gluón verde-antiazul y, con ello, pasa a tener color azul. El gluón genera un cambio de color en los quarks. El gluón verde-antiazul convierte un quark verde en uno azul y un quark azul en uno verde.

ACTIVIDADES

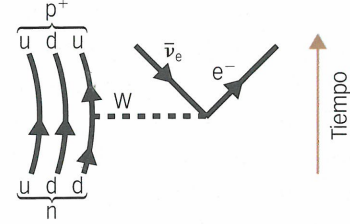
12. Observa la interacción que se describe en el siguiente esquema:



- Identifica el tipo de interacción fundamental
- Comprueba que se conservan la carga eléctrica y los números leptónico y bariónico.

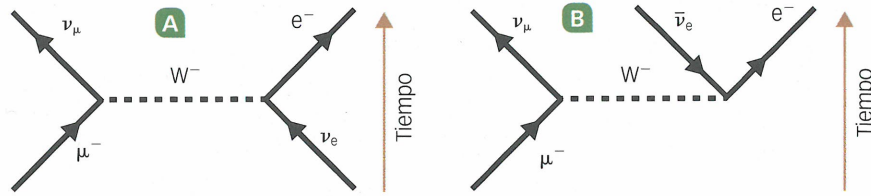
4.2. La interacción débil y el cambio de sabor

La interacción débil es responsable del cambio de sabor de las partículas elementales: cambia un leptón en otro leptón o un quark en otro quark.



Si analizamos el decaimiento beta teniendo en cuenta los quarks que forman parte de cada hadrón, vemos que un quark d del neutrón (udd) se convierte en un quark u. La combinación de quarks resultante (udu) origina un nuevo hadrón: el protón.

También es una manifestación de la interacción débil la transformación del muon (μ^-) en electrón, que se puede producir tras el choque con un neutrino electrónico (esquema A) o tras el decaimiento del muon (esquema B).

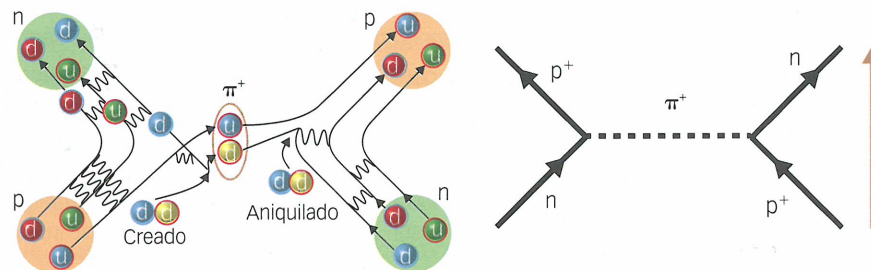


4.3. La interacción fuerte

La interacción fuerte solo afecta a quarks. Los leptones no la sienten. Recuerda que se manifiesta de dos maneras:

- Fuerza fuerte fundamental.** Mantiene unidos los quarks con el gluón como partícula de intercambio.
- Fuerza fuerte residual.** Mantiene unidos los nucleones en el núcleo de un átomo con el mesón como partícula de intercambio.

El gluón es la partícula de intercambio en la fuerza fuerte. Ella misma es una partícula con color, formada por un color y un anticolor. Esto hace que los gluones, además de actuar como mediadores de la fuerza fuerte, puedan interactuar ellos mismos mediante esa fuerza generando un par quark-antiquark. Esto explica la formación de los mesones mediadores.



Interacción entre un protón y un neutrón. Cuando el protón (duu) interactúa con el neutrón (ddu), sale uno de sus quarks u. El gluón que lo mantenía unido crea un par $d\bar{d}$. El quark $\bar{d}$ se une al quark u saliente y forma al mesón π^+ ($u\bar{d}$). En el protón original, un quark d sustituye a un quark u; se convirtió en neutrón (ddu). La partícula de intercambio (π^+) se une al quark d del neutrón y el par $d\bar{d}$ se aniquila. En el neutrón inicial quedan los quarks (udu), es decir, ahora es un protón.

El esquema simplificado muestra el resultado como consecuencia del intercambio de un pión, el mediador de la fuerza de color residual que mantiene unidos a los nucleones. Resultado neto: el intercambio del pión hace que el neutrón se convierta en un protón y el protón se convierta en un neutrón.

4.4. Teorías de unificación de las fuerzas fundamentales

Los sucesivos conocimientos sobre las interacciones permitieron unificar algunas que inicialmente se consideraban diferentes.

- Newton descubrió las **fuerzas gravitacionales** y estableció su fórmula matemática a finales del siglo XVII. Con ello superó la barrera cielo-Tierra, al explicar el movimiento de los cuerpos celestes con las mismas leyes con que explicaba el movimiento de los cuerpos sobre la Tierra.
- A finales del siglo XVIII, Coulomb descubrió la ley que permite calcular las fuerzas entre cuerpos con carga **eléctrica**. En los primeros años del siglo XIX, Oersted, Ampère y otros lograron establecer las leyes de las **fuerzas magnéticas** entre imanes y/o corrientes eléctricas.
- A finales del siglo XIX, Maxwell concluyó que ambas eran manifestaciones de una misma interacción. Su unificación dio lugar a la fuerza **electromagnética**. Si las cargas están en reposo, se manifiestan fenómenos eléctricos; y si están en movimiento, fenómenos magnéticos.
- Hacia 1930, muchos contribuyentes identificaron las **fuerzas débiles**, como la interacción presente cuando una partícula se convierte en otra, y las fuerzas fuertes mantienen estable el núcleo de los átomos.
- En 1960 el físico estadounidense Steven Weinberg (n. 1933) y el paquistaní Abdus Salam (1926-1996) desarrollaron una teoría según la cual las fuerzas electromagnética y débil son dos manifestaciones de una misma interacción: la **fuerza electrodébil**. Ambas se manifiestan idénticas a altas energías. Por esta unificación recibieron el premio Nobel de Física en 1979.
- Posteriormente, en 1970, Sheldon Glashow (n. 1932) y Howard Georgi (n. 1947) desarrollaron una nueva teoría que, además de corregir algunos errores de la anterior, unificaba las fuerzas electrodébiles y las fuertes: es la **teoría de la gran unificación (TGU)**. Ambas fuerzas eran dos manifestaciones de una misma interacción y se unificaban cuando la energía era suficientemente alta (10^{15} GeV). Esto aún no se ha podido comprobar de forma experimental.

Por el momento no existen estudios teóricos que permitan relacionar la interacción gravitatoria y el resto de las interacciones. Aunque la fórmula de la fuerza gravitatoria y la electrostática es similar, su intensidad es muy distinta. No es posible experimentar con la gravedad a escala subatómica. Por tanto, no hay previsión acerca de la posibilidad de una **teoría del todo**.

SABER MÁS

La desintegración del protón

El decaimiento beta del protón es, por el momento, una predicción teórica de teorías de unificación de las fuerzas fundamentales.

Según estas teorías, el protón no es estable y debería desintegrarse al cabo de 10^{33} años (semivida).

Se ha tratado de observar este decaimiento en el detector de neutrinos Super Kamiokande (Japón), cuyo tanque almacena una cantidad de agua en la que se calcula que hay $7,5 \cdot 10^{33}$ protones.

Estadísticamente se podrían dar hasta tres decaimientos de protón en un año, que podrían ser captados por sus fotodetectores. La experiencia ha sido, por el momento, infructuosa: no se ha observado la desintegración de ningún protón.

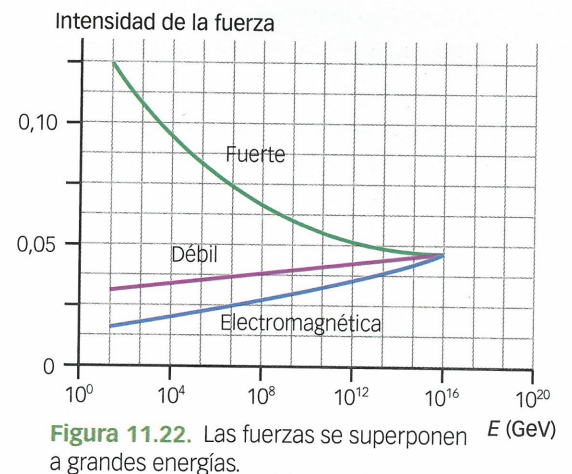


Figura 11.22. Las fuerzas se superponen a grandes energías.

Siglo XVII	Siglo XVIII-XIX	Siglo XX	Siglo XXI
Descubrimiento de las fuerzas gravitacionales Newton (1686)	Descubrimiento de las fuerzas eléctricas Coulomb (1785) Descubrimiento de las fuerzas magnéticas Coulomb (1795) Oersted (1820) Ampère (1820)	Unificación: Fuerzas electromagnéticas Maxwell (1860) Unificación: Fuerzas electrodébiles Weinberg y Salam (1960) Unificación: Fuerzas electrodébiles y fuerzas fuertes: teoría de la gran unificación Glashow y Georgi (1970)	Unificación de todas las fuerzas ¿teoría del todo?
		Descubrimiento de las fuerzas débiles Varios autores (1930) Descubrimiento de las fuerzas fuertes Varios autores (1930)	

5 Cómo se generan y detectan las partículas

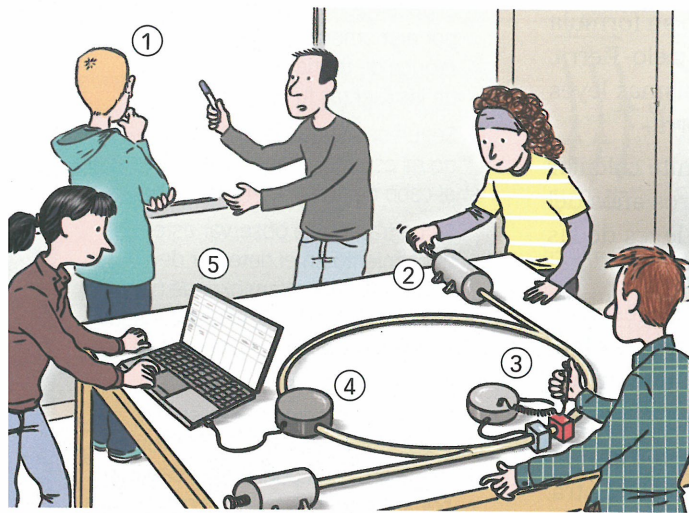


Figura 11.23. Teoría y experimentación se unen para descubrir nuevas partículas subatómicas.

1. Teoría.
2. Fuente de partículas.
3. Acelerador.
4. Detector.
5. Análisis de datos.

Algunas de las partículas de materia previstas por el modelo estándar existen en la naturaleza y se pueden detectar, aislar y determinar sus propiedades. Ya hemos visto cómo se han aislado los electrones, protones y neutrones, partículas que forman parte de los átomos. Los neutrinos, los muones y los positrones se han detectado estudiando los rayos cósmicos o analizando procesos radiactivos.

Pero hay partículas que no se encuentran en la naturaleza que está a nuestro alcance. Para obtenerlas se llevan a cabo experimentos en los **aceleradores de partículas**.

En estas complejas máquinas se hacen colisionar partículas a muy alta energía, ya sea entre sí o contra un blanco. Como resultado del choque aparecen otras partículas que se pueden detectar e identificar. El procedimiento requiere:

- Una **fente** de partículas.
- Un **acelerador** que les proporcione una elevada energía antes del choque.
- Un **detector** de las partículas que resultan del choque.
- Un procedimiento para **analizar los datos** que aporte el detector, con el fin de caracterizar las partículas obtenidas.

5.1. Fuentes de partículas

Las partículas que se utilizan habitualmente como proyectiles en los aceleradores son electrones, protones y sus antipartículas.

- Para obtener **electrones** se calienta una lámina metálica hasta una temperatura suficientemente alta. Entonces se pueden extraer los electrones sometiéndolos a una diferencia de potencial elevada.
- Para obtener **protones** se lanzan electrones a elevada energía contra átomos de hidrógeno para extraerle su electrón.
- Para obtener las **antipartículas** se «disparan» electrones muy energéticos contra un hilo metálico. De la interacción resulta un electrón de menor energía y fotones gamma. Dos fotones gamma con suficiente energía pueden interactuar y formar una partícula y su correspondiente antipartícula (proceso opuesto al aniquilamiento de una partícula por su antipartícula). Como tienen carga opuesta, se pueden separar sometiéndolas a la acción de un campo magnético (recuerda el tema sobre campos magnéticos).

La pareja partícula/antipartícula obtenida depende de la energía de los fotones. Como la masa en reposo de un electrón es 0,511 MeV, si la energía de los fotones supera el doble de este valor, se podrá obtener un par electrón-positrón.

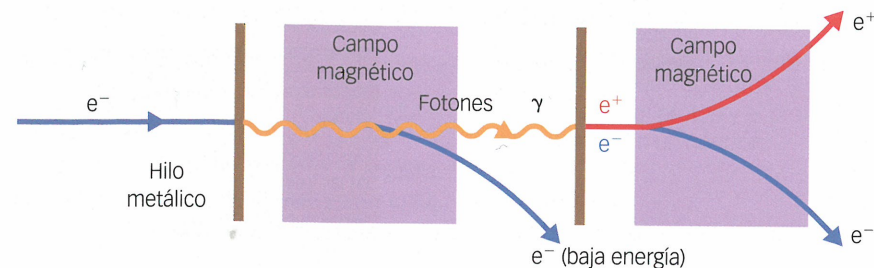


Figura 11.24. Procedimiento para generar antielectrones (e^+).

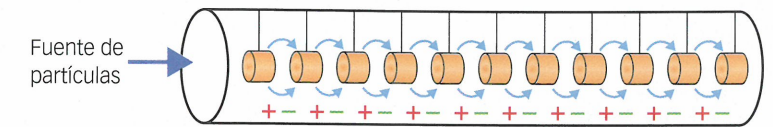
5.2. Acelerador de partículas

Un **acelerador de partículas** es un dispositivo cuyo objetivo es lograr que las partículas tengan una energía suficientemente alta como para que, cuando choquen, produzcan nuevas partículas.

Para conseguirlo se somete a partículas cargadas a la acción de campos magnéticos que consiguen que su velocidad sea cada vez mayor. Se construyen dos tipos de aceleradores: lineales y circulares.

Acclerador lineal

Utilizan un conjunto de placas o tubos en línea a los que se aplica un campo eléctrico alterno. La partícula cargada se mueve hacia una placa y se acelera como resultado de su potencial. Cuando llega a ella, se cambia la polaridad y la partícula se acelera viajando hacia la placa siguiente. Cuando la velocidad de las partículas se acerca a la de la luz, hay que realizar la inversión de los campos eléctricos a una frecuencia próxima a las microondas.



El acelerador lineal más grande del mundo es el SLAC, en Stanford (EE. UU.), de 3,2 km de longitud. Puede alcanzar 20 GeV, y se utiliza para producir colisiones electrón-positrón.

Actualmente la mayoría de los aceleradores lineales se utilizan para obtener las partículas que luego se van a usar en radioterapia.



Figura 11.26. Utilización del acelerador lineal SLAC en Estados Unidos.

Acclerador circular

Su funcionamiento es similar al ciclotrón que vimos al estudiar el campo magnético. Su ventaja con respecto a los aceleradores lineales es que pueden conseguir grandes aceleraciones en un espacio reducido, pues, en principio, no hay límite al número de vueltas que pueden dar las partículas al anillo, en el proceso de aumentar su velocidad. No obstante, cuando una partícula cargada gira, tiene una aceleración centrípeta que le hace emitir radiación electromagnética, de mayor energía cuanto mayor es su velocidad. Esta energía de sincrotrón limita la energía final que adquieren las partículas.

Son aceleradores de este tipo los sincrotrones de alta energía como el SPS (Supersincrotrón de Protones), el acelerador del LEP (Gran Colisionador electrón-positrón) y el del LHC (Gran Colisionador de Hadrones), el acelerador de partículas más potente. Todos estos pertenecen al CERN (Laboratorio Europeo de Física de partículas), y están ubicados en la frontera entre Francia y Suiza.

- El acelerador de partículas más potente de Estados Unidos es el **Tevatrón**, que está en el Fermilab, cerca de Chicago. Acelera protones y antiprotones hasta energías de 1 TeV. En este laboratorio se descubrieron los quarks fondo (1977) y cima (1995), y el neutrino del tau (2000).
- El acelerador del **LEP**, con energías previstas de 45 GeV por haz, fue diseñado para producir bosones. Mejoras posteriores permitieron superar 130 GeV, y el resultado fue la detección en 1983 de los bosones Z^0 , W^+ y W^- .
- El acelerador del **LHC**, con una energía de 7 TeV por haz, fue diseñado para colisionar protones. En 2012 se realizó en él un experimento en el que se detectó una nueva partícula «compatible con el bosón de Higgs», con una masa de 125 GeV/c². En 2015 comenzaron a realizarse experimentos de mayor energía donde se recrean las condiciones presentes en el universo en instantes inmediatamente posteriores al *big bang*.



Figura 11.25. Acelerador circular.

5.3. Colisión y generación de nuevas partículas

Cuando se considera que las partículas tienen la energía adecuada al experimento que se quiere realizar, se provoca su colisión.

Como consecuencia del choque se generan nuevas partículas (y en muchos casos también antipartículas), de tal modo que la masa-energía final sea igual a la masa-energía de las partículas colisionantes.

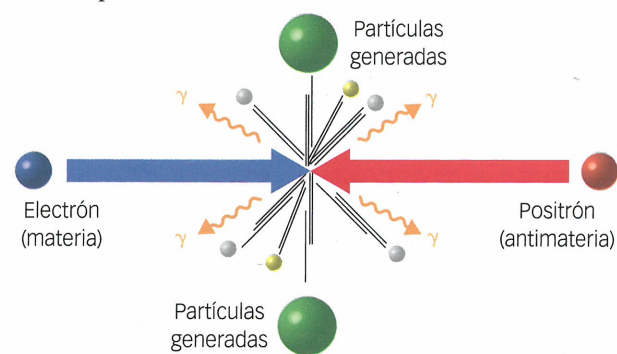


Figura 11.27. Colisión entre materia y antimateria.

En la imagen se ilustra el choque entre un electrón y un positrón. En el acelerador han podido alcanzar una velocidad cercana a la de la luz, por lo que su energía es mucho mayor que la masa en reposo. El resultado de la colisión pueden ser partículas de masa mayor que la del electrón o la del positrón.

5.4. Detectores de partículas

Una vez producida la colisión, hay que detectar e identificar las partículas resultantes. El procedimiento y el tipo de detector empleado dependen del tipo de partículas que se espera encontrar.

Cámara de niebla

Fue uno de los primeros detectores de partículas cargadas. Se utilizó para detectar partículas de radiación ionizante, como partículas alfa, electrones o positrones. Es un recinto cerrado que contiene vapor de un gas superenfriado y supersaturado. Cuando el haz que contiene las partículas a estudiar llega a la cámara, las partículas cargadas actúan como núcleos de condensación del vapor y producen una estela que permite seguir su trayectoria. Al aplicar un campo magnético perpendicular al haz, la trayectoria se curva de distinto modo según cuál sea su carga y su masa. Así se pueden fotografiar y analizar las trayectorias e identificar las partículas.

La cámara de burbujas

Es similar a la de niebla, con la diferencia de que dentro del recinto se coloca un líquido que está exactamente en su punto de ebullición. El paso de la partícula de alta energía a través del líquido deja un rastro de burbujas que se puede seguir y fotografiar.

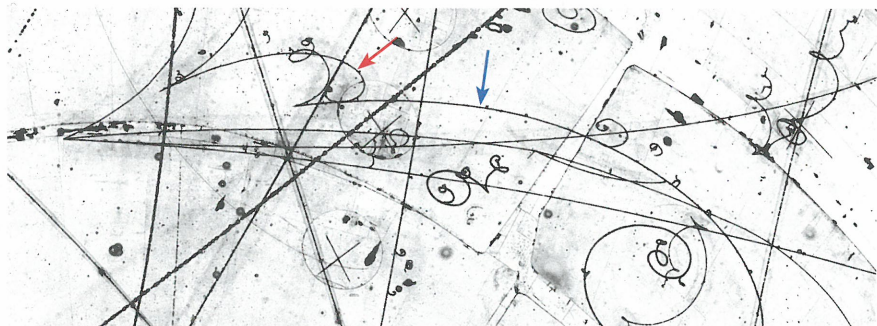


Figura 11.29. La imagen muestra el rastro que dejan partículas que llegan a una cámara de burbujas.

Observa que las trayectorias de partículas con cargas eléctricas opuestas se curvan en sentidos opuestos.

Detectores multipropósito

Los grandes laboratorios de partículas realizan experiencias de altas energías que pueden dar lugar a la aparición de partículas de muy diversa índole. Para detectarlas disponen de detectores multipropósito, es decir, un sistema con diversas capas, en cada una de las cuales se puede detectar un determinado tipo de partículas.

El LHC es el colisionador de partículas más potente que existe. Los protones y antiprotones generados pasan por diversos pre-aceleradores en los que aumenta su energía de forma progresiva. Finalmente entran en el colisionador y, cuando su energía es adecuada, se provoca su choque en un lugar donde se puedan detectar y analizar las partículas resultantes.

Los experimentos realizados hasta ahora en esta instalación han utilizado los detectores ATLAS (aparato toroidal del LHC) y CMS (solenoides compacto de muones). Envolviendo la cámara en la que se produce la trayectoria de las partículas que colisionan está:

- El calorímetro electromagnético, que detecta **fotones, electrones y positrones**.
- El calorímetro de hadrones, que detecta **mesones y bariones**.
- Por último, la cámara de **muones**.

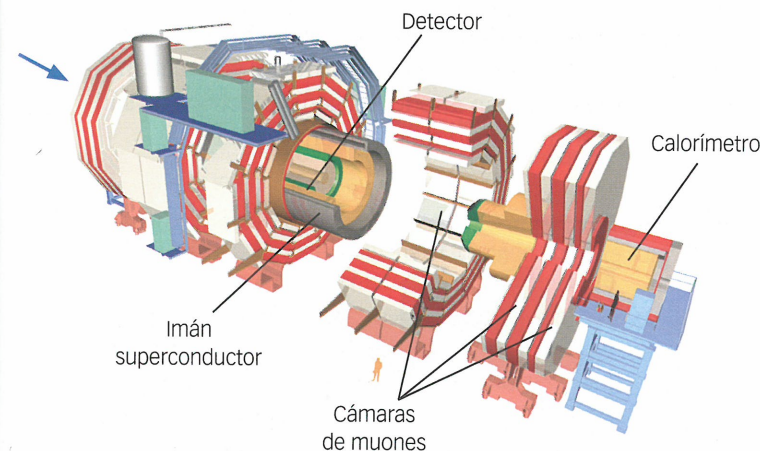


Figura 11.31. Detector CMS (solenoides compacto de muones).

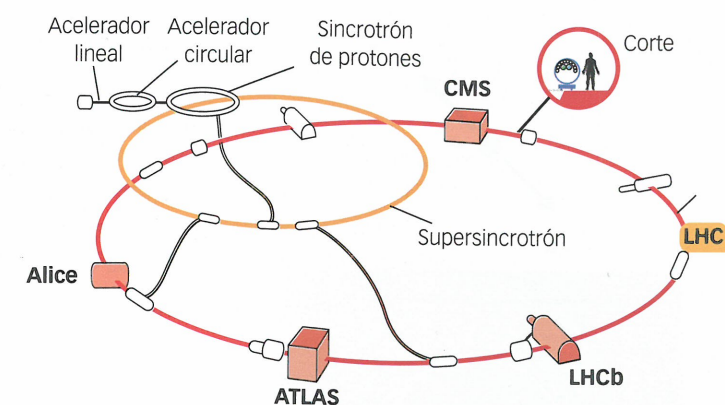


Figura 11.30. Disposición de los pre-aceleradores y detectores del Gran Colisionador de Hadrones (LHC).

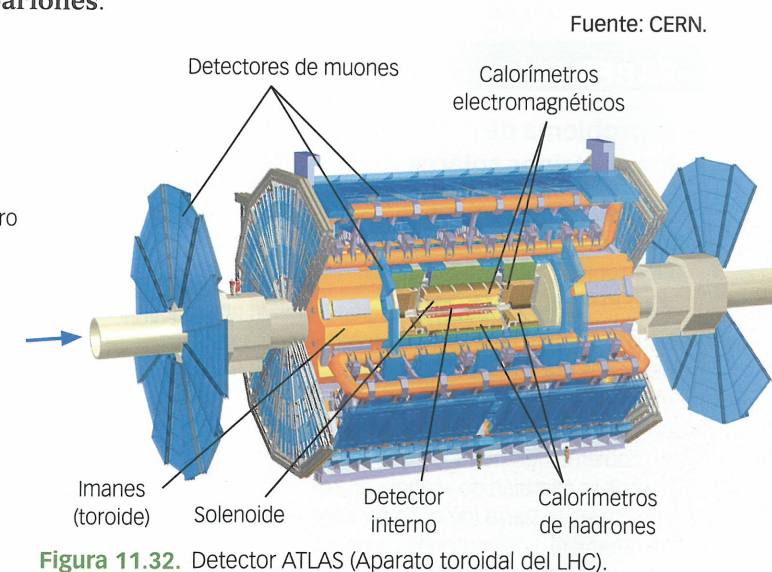


Figura 11.32. Detector ATLAS (Aparato toroidal del LHC).

Las diferentes partículas darán señal en la capa apropiada. Los neutrinos escapan al detector. Aunque se puede deducir su presencia si se detecta pérdida de energía al realizar el balance energético de la colisión.

ACTIVIDADES

13. Razona qué ventajas e inconvenientes puede tener un acelerador lineal frente a uno circular.
14. Busca información que te permita construir una línea de tiempo en la que figure la energía alcanzada en cada colisionador y las partículas detectadas en él.

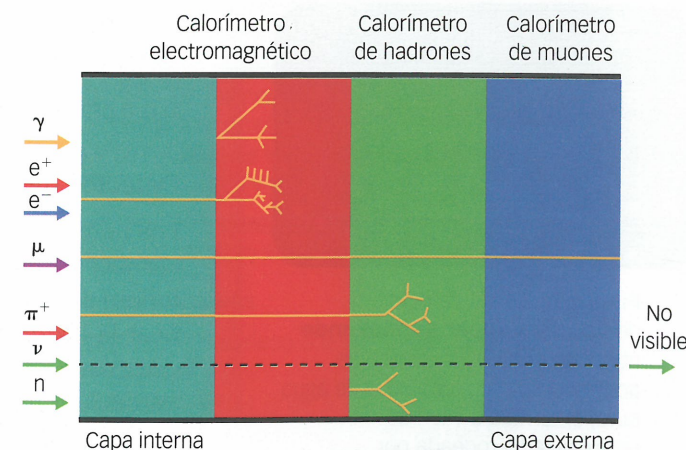


Figura 11.33. Disposición de diferentes partes en un detector multipropósito.

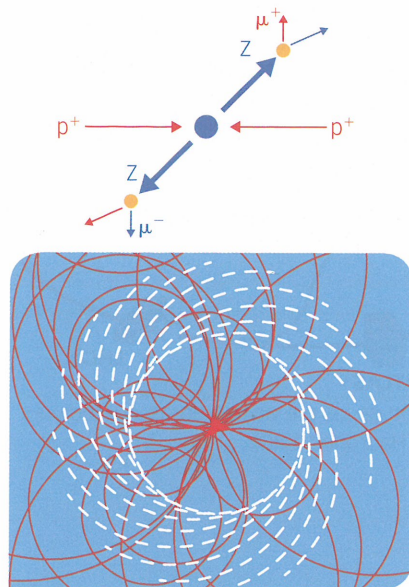


Figura 11.34. Huella que dejan las partículas resultantes de la colisión descrita. Analizando las trayectorias se puede detectar la presencia de los muones.

SABER MÁS

El problema de los neutrinos solares

En las reacciones solares de fusión nuclear se generan neutrinos electrónicos, muchos de los cuales acaban llegando a la Tierra.

Pero el número detectado de estos neutrinos era mucho menor del esperado ($\approx 1/3$). En 2002 físicos de Ontario (Canadá) resolvieron el problema demostrando que los neutrinos cambian de «sabor» en su viaje hasta la Tierra (de ocho minutos de duración). Los neutrinos de muon y tau no eran detectados.

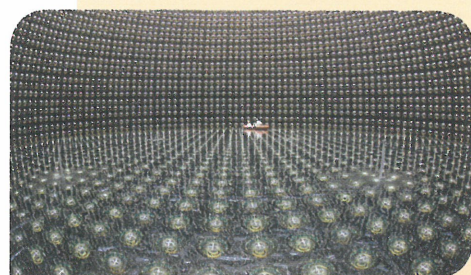


Figura 11.36. El detector de neutrinos **Super Kamiokande** utiliza un depósito cilíndrico de acero, con 50 000 toneladas de agua pura, enterrada a 1 km de profundidad y rodeada por 11 000 tubos de fotomultiplicadores.

5.5. Análisis de datos

Analizando la trayectoria que siguen las partículas en cada detector, los científicos deducen sus características como la masa, la carga, etc. Esto requiere la intervención de potentes sistemas informáticos y la participación de un elevado número de personas. Es frecuente que en un gran laboratorio como el Fermilab o CERN sus científicos trabajen en colaboración con científicos y sistemas de cálculo de diversas instituciones, repartidos por todo el mundo.

A veces se trata de detectar una partícula cuyas características se habían deducido teóricamente. En este caso se puede diseñar un *software* que simule la experiencia con la partícula teórica y compare sus resultados con los obtenidos realmente.

Puesto que se trata de descubrir partículas, en muchas ocasiones los investigadores tendrán que diseñar tecnologías completamente nuevas para su estudio. Este hecho da lugar a grandes avances en la ciencia y la tecnología, muchos de los cuales los podrá aprovechar la sociedad en el futuro.

5.6. Detectores de partículas no asociados a aceleradores

El espacio exterior es una fuente de partículas como los fotones o los neutrinos. Para su detección se emplean métodos diferentes a los descritos.

Fotomultiplicadores

Son detectores de fotones. Constan de un fotocátodo que emite electrones cuando incide sobre él un fotón de energía adecuada (de manera similar al efecto fotoeléctrico). Un dispositivo interno, llamado **dinodo**, actúa de multiplicador y enfoca los electrones hacia un ánodo. La señal eléctrica de salida es proporcional a la energía e intensidad de los fotones incidentes.

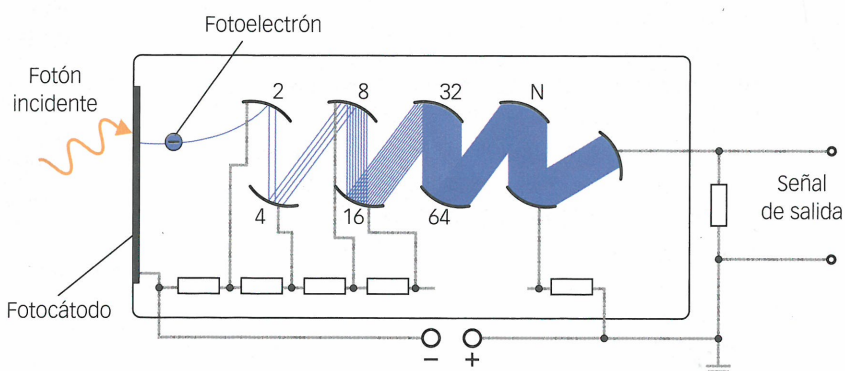


Figura 11.35. Los fotoelectrones son atraídos por el primer dinodo y, al incidir sobre él, se libera un electrón secundario. El proceso sigue en los distintos dinodos, lo que provoca un efecto multiplicador, ampliando la señal de salida.

Detector de neutrinos

Los neutrinos son unas partículas esquivas que se detectan en los rayos cósmicos. Interaccionan muy raramente con la materia. Por eso para detectarlos se necesita una gran masa y un sistema muy sensible capaz de amplificar la luz producida. Además, el detector debe estar blindado por otra gran masa con el fin de que no interfiera con la señal producida por otras partículas que también se encuentran en los rayos cósmicos.

Un detector de neutrinos puede estar formado en una gran masa de agua o hielo completamente rodeada de fotomultiplicadores. Uno de los más famosos es el detector Super Kamiokande, en Japón.

→ SABER HACER

Estudiar partículas e interacciones

3 El agua, H_2O , es la sustancia más abundante en los seres vivos. Su distribución en la Tierra cubre las tres cuartas partes de su superficie. En distintos lugares de la Tierra aparece en estado sólido, líquido o gas.

Analiza la sustancia agua en los distintos cuerpos o sistemas materiales que forma y determina las partículas que se pueden identificar y las interacciones fundamentales que puede experimentar cada una de ellas.

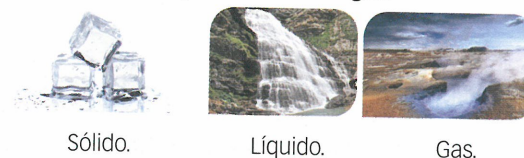
SOLUCIÓN

1. Comprende el enunciado.

Datos conocidos	Resultados a obtener
- Fórmula química del agua. - Estados físicos en que aparece sobre la Tierra.	- Identificar las diferentes partículas que se pueden encontrar en el agua - Analizar las interacciones para cada partícula.

2. Analiza.

• **Nivel macroscópico:** sustancia agua.



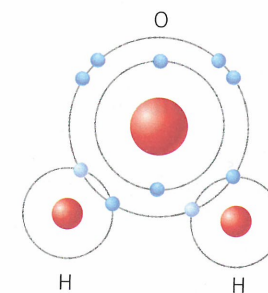
Cualquiera que sea el estado físico en el que se encuentre una determinada masa de agua, sufre la interacción gravitatoria.

El agua es una especie neutra. Por tanto, ningún cuerpo o sistema material formado por esta sustancia puede sufrir interacción electromagnética.

La partícula mediadora de la interacción gravitatoria entre el agua y cualquier otro cuerpo o sistema material es el **gravitón** (aún no detectado).

• **Nivel molecular.**

En la molécula de agua, el átomo de O se une a dos átomos de H mediante enlaces covalentes. Los electrones de cada enlace son atraídos por los núcleos de cada átomo.



El núcleo de los átomos tiene masa (protones y neutrones) y carga positiva (protones). Los electrones tienen masa y carga (negativa).

La única interacción significativa es la **electrostática** (10^{36} veces más intensa que la gravitatoria).

La partícula mediadora de la interacción es el **fotón**. La molécula de agua puede absorber o emitir fotones de determinada energía. Ello nos permite verla y analizar su espectro de absorción o emisión.

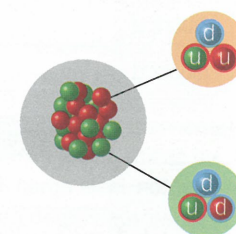
• **Nivel atómico.**

Tanto el átomo de O como el de H están formados por un núcleo con masa (protones y neutrones) y carga positiva (protones), y una corteza con electrones (masa y carga negativa).

Esas partículas experimentarán **interacción electromagnética**, con el **fotón** como partícula mediadora.

• **Dentro del núcleo.**

Cada protón del núcleo y cada neutrón están formados por tres quarks, cada uno de un color, de forma que el conjunto resulte una partícula sin color.



Los quarks de cada protón o de cada neutrón sufren **interacción nuclear fuerte fundamental**.

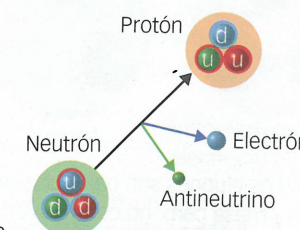
La partícula mediadora de la interacción es un **gluon**.

A su vez, los nucleones (protones y neutrones) de un núcleo se mantienen unidos gracias a la interacción nuclear fuerte residual. La partícula mediadora de la misma es un **mesón**.

Tanto los protones como los neutrones o los mesones son hadrones, es decir, partículas formadas por quarks. Neutrones y protones: tres quarks. Mesones: un quark y un antiquark.

• **Decaimiento beta.**

Los nucleones pueden sufrir un decaimiento beta en el que un quark cambia de sabor. Por ejemplo, si un quark d de un neutrón se convierte en u, el neutrón se convierte en protón. Para que se cumplan las leyes de conservación se deben liberar un electrón y un antineutrino electrónico.



La interacción responsable del fenómeno es la **nuclear débil**, y la partícula mediadora es un **bosón gauge W^-** .

3. Evalúa el resultado.

Las partículas de materia que se pueden distinguir en un cuerpo o sistema material dependen del nivel de detalle con que se analice. Las interacciones que puede sufrir una partícula dependen de sus características (masa, carga, tamaño, etc.).

