

Las fuerzas que determinan la estructura del Universo son las siguientes:

- Fuerza Fuerte. Es determinante para entender la estabilidad de los núcleos atómicos
- Fuerza Electromagnética. Determina las propiedades químicas de los elementos.
- Fuerza débil. Interviene en el decaimiento radiactivo de los núcleos atómicos
- Fuerza Gravitacional. Determina la estructura y evolución del Universo a gran escala.

A comienzos del Siglo XX, se desarrolló una de las teorías más profundas: La Mecánica Cuántica. Con ella se han comprendido la Química, la Física Atómica y la Física Nuclear. Ha transformado nuestras vidas porque hizo posible la invención del transistor y de los computadores modernos.

Cuando se estudian las fuerzas de la naturaleza, usando la Mecánica Cuántica, se descubre una ley fundamental

**Asociada a cada fuerza de la naturaleza, se encuentra una partícula**

El alcance de una fuerza está dado por

$$r \sim \frac{\hbar}{mc}$$

donde  $\hbar = 1 \times 10^{-34} \text{m}^2 \text{kg} / \text{s}$  es la constante de Planck (dividida por  $2\pi$ ),  $c = 3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  es la velocidad de la luz en el vacío y  $m$  es la masa en reposo de la partícula que transmite la fuerza.

- Las soluciones de la **ecuación de Dirac** contienen estados cuánticos de energía negativa.

$$E = \pm \sqrt{p^2 + m^2}$$

- Como resultado un electrón siempre podría radiar energía cayendo en un estado de energía negativa. Incluso peor que eso, podría estar radiando una cantidad infinita de energía porque habría disponibles infinitos estados de energía negativa.
- Para resolver esta situación que iba contra la física, Dirac postuló que un "mar" de electrones de energía negativa llenaban el universo, ocupando todos los estados de energía negativa de forma que, debido al **principio de exclusión de Pauli** ningún otro electrón podría caer en ellos.

## Nuevos Procesos:

- Creación de pares partícula-antipartícula:  $\gamma \rightarrow e^- + e^+$ . (Esta reacción se da en presencia de un núcleo. En el vacío viola la conservación del cuadrimomentum.)

A veces, una de estas partículas con energía negativa podría ser elevada desde este **mar de Dirac** a un nivel de energía mayor para convertirse en una partícula de energía positiva. Pero, cuando era elevada, esta partícula dejaba un *hueco* (antipartícula) detrás en el mar, que actuaría exactamente como un electrón de energía positiva pero con carga contraria. Dirac interpretó estos electrones inversos como positrones.

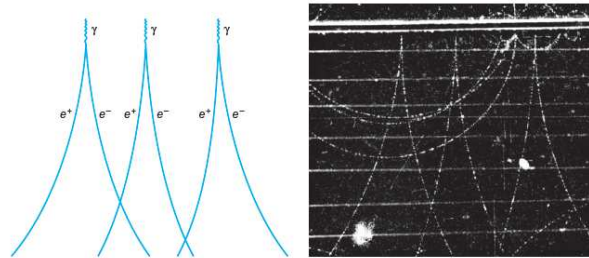
- Aniquilación de pares:  $e^{-} + e^{+} \rightarrow \gamma$

Un electrón de energía positiva encuentra un hueco en el mar de Dirac y salta a este estado liberando un fotón, exactamente como sucede en un átomo.

El positrón fue descubierto en 1932 en los rayos cósmicos.

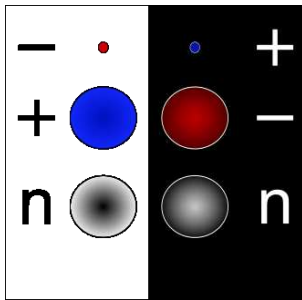
La partícula y su antipartícula tienen:

- La misma masa  $m$
- El mismo espín  $J$
- Cargas eléctricas opuestas  $q$  y  $-q$ .



**Figura 1.**

En física de partículas, la **antimateria** es la extensión del concepto de **antipartícula** a la materia. Así, la antimateria es una forma de materia menos frecuente que está constituida por antipartículas en contraposición a la materia común que está compuesta de **partículas**. Por ejemplo, un *antielectrón* (un **electrón** con carga positiva, también llamado **positrón**) y un **antiprotón** (un **protón** con carga negativa) podrían formar un átomo de antimateria, de la misma manera que un electrón y un protón forman un átomo de hidrógeno. El contacto entre materia y antimateria ocasiona su **aniquilación** mutua, esto no significa su destrucción, sino una transformación que da lugar a **fotones** de alta energía, que producen **rayos gamma**, y otros pares partícula-antipartícula.



**Figura 2.** Las partículas que componen la antimateria, tienen cargas opuestas a las de la materia.

Por qué hay más materia que antimateria en el Universo?

El proceso  $p \rightarrow e^+ + \nu_e$  no está prohibido. Satisface todas las leyes de conservación conocidas. Además  $Q > 0$ . Sin embargo la vida media del protón  $> 10^{35}$  años.

Por qué no decae el protón?

En Física de Partículas se sigue el siguiente precepto:

Todo lo que no está prohibido debe realizarse

Es necesario prohibir el decaimiento del protón. Por esta razón se introdujo un nuevo número cuántico para clasificar las partículas elementales: El número bariónico (B). Se postula que el número bariónico se conserva.

Se asigna:  $B(p) = 1$ ,  $B(e) = 0$ ,  $B(\nu) = 0$ . Estudiando un proceso que se da:

$n \rightarrow p + e + \bar{\nu}_e$ , se tiene  $B(n) = B(p) + B(e) + B(\bar{\nu}_e)$ ,  $B(n) = B(p) = 1$ .

$p + \bar{p} \rightarrow 2\gamma$  se da,  $B(\bar{p}) = -B(p)$ , dado que  $B(\gamma) = 0$ . Dado que una partícula y una antipartícula se pueden aniquilar en dos fotones, en general  $B(\bar{P}) = -B(P)$ .

Todas las interacciones conservan número bariónico.



En la física de altas energías, el número leptónico es el número de leptones menos el número de antileptones.

En forma de ecuación,

$$L = n_\ell - n_{\bar{\ell}}$$

así todos los leptones tienen asignado el valor de  $+1$ , antileptones  $-1$ , y partículas no leptónicas  $0$ . El número leptónico (a veces llamado también carga leptónica) es un número cuántico aditivo, esto significa que su suma es preservada en interacciones (lo opuesto a los números cuánticos multiplicativos como la paridad, donde el producto se preserva).

A lado del número leptónico, la familia de números leptónicos están también definidos:

- el número electrónico  $L_e$  para el electrón y el electrón-neutrino;
- el número muónico  $L_\mu$  para el muon y el neutrino muónico;
- el número tauónico  $L_\tau$  para el leptón tau y el tau-neutrino;

con el mismo esquema de asignación que el número leptónico:  $+1$  para partículas de la familia correspondiente,  $-1$  para las antipartículas, y  $0$  para leptones de otras familias o partículas no leptónicas.

Muchos modelos, incluyendo el modelo estándar de la física de partículas confía en la conservación del número leptónico: el número leptónico permanece constante durante la interacción. Por ejemplo, en la desintegración beta:

$$\begin{array}{r}
 n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e \\
 \text{L: } 0 = 0 + 1 - 1
 \end{array}$$

El número leptónico antes de la reacción es 0 (el neutrón, n, es un barión y por lo tanto no hay leptones previos), mientras que el número leptón después de la reacción es 0 para el protón, +1 para el electrón (un leptón), -1 para el antineutrino (un antileptón). Así el número leptónico es cero después de la desintegración, y así se conserva.

La familia de número de leptones aparece del hecho que el número leptónico es usualmente conservado en cada familia leptónica. Por ejemplo,

$$\begin{array}{r}
 \mu \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \\
 \text{L: } 1 = 1 - 1 + 1 \\
 \text{L}_e: 0 = 1 - 1 + 0 \\
 \text{L}_\mu: 1 = 0 + 0 + 1
 \end{array}$$

El isospín fue introducido por [Werner Heisenberg](#) para explicar muchas simetrías relacionadas:

- La [masa](#) de los neutrones y de los protones es casi idéntica: son casi degenerados y se los llama [nucleones](#). Aunque el protón tiene carga positiva y el neutrón es neutro, son casi idénticos en todos los otros aspectos.
- La fuerza de la interacción fuerte entre cualquier par de nucleones es la misma, independiente de si interactúan como protones o como neutrones (independencia de carga).
- La masa de un [pion](#) que media entre la interacción fuerte y los nucleones es la misma, independiente de los nucleones involucrados. En particular, la masa de un pion positivo (y su [antipartícula](#)) es cercamente idéntica a la de un pion neutro.

En [mecánica cuántica](#), cuando un [hamiltoniano](#) tiene una simetría, esta simetría se manifiesta en si misma a través de un conjunto de [estados](#) que tienen (casi) la misma energía; esto es, los estados son degenerados. En la [física de partículas](#), la masa es sinónimo de energía (desde que se conoce que  $E = mc^2$  y así la masa degenerada del neutrón y el protón en una simetría hamiltoniana describe la interacción fuerte. El neutrón tiene la masa ligeramente superior: la masa degenerada no es exacta. El protón está cargado, el neutrón no. Sin embargo, en este caso se podría en general por mecánica cuántica, la apariencia de la simetría puede ser imperfecta, como si fuera una [perturbación](#) de otras fuerzas. que dan lugar a ligeras diferencias entre estados.

Agrupamos al protón y al neutrón en una representación de isospín 1/2:  $N_a = \begin{pmatrix} p \\ n \end{pmatrix}$ , llamada nucleón

$$|p\rangle = |I = \frac{1}{2}, I_z = +\frac{1}{2}\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, |n\rangle = |I = \frac{1}{2}, I_z = -\frac{1}{2}\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix},$$

Lo mismo para los piones:

$$|\pi^+\rangle = |I = 1, I_z = +1\rangle, |\pi^0\rangle = |I = 1, I_z = +0\rangle, |\pi^-\rangle = |I = 1, I_z = -1\rangle.$$

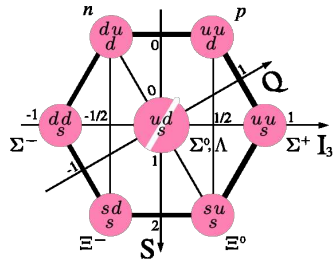
$Q = I_3 + \frac{B}{2}$ ,  $I_3$  es la componente z del isospín I,  $|I_3| \leq I$ ,  $B$  es el número bariónico.

La interacción fuerte conserva isospín.

## Extrañeza

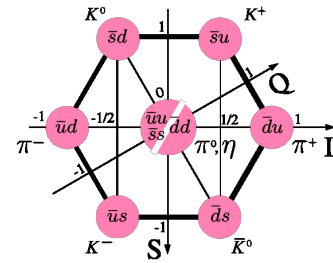
La extrañeza(S) fue introducida por Murray Gell-Mann y Kazuhiko Nishijima, originalmente para explicar el hecho de que ciertas partículas, como el kaón o el hiperón fueran creadas fácilmente en colisiones de partículas, y degradadas aun más lentamente de lo esperado para sus grandes masas y producciones de sección eficaz. Al notar que las colisiones parecían siempre producir pares de estas partículas, se postuló que una nueva cualidad conservada, apodada "extrañeza", se preservaba durante esta creación pero *no* se conservaba en su decaimiento.

La extrañeza se conserva durante las interacciones fuertes y electromagnéticas, pero no durante las interacciones débiles.



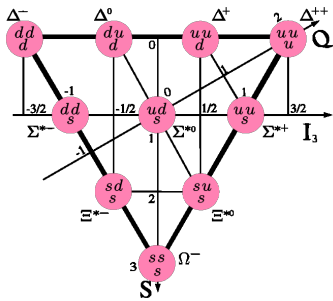
**Figura 3.**

Bariones  $s = \frac{1}{2}$



**Figura 5.**

Mesones  $s = 0$



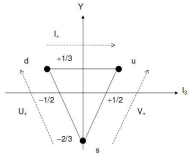
**Figura 4.**

Bariones  $s = \frac{3}{2}$

Hipercarga:  $Y = B + S$

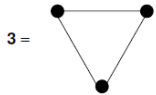
$$Q = I_3 + \frac{Y}{2}$$

Todas las figuras anteriores se pueden construir en base a triángulos:



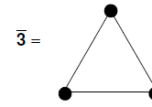
**Figura 6.**

Pesos de los quarks



**Figura 7.**

Quarks



**Figura 8.**

Antiquarks

Los *quarks* no se encuentran libres en la naturaleza sino que se agrupan formando **hadrones**. Éstos se dividen en dos tipos:

- **Mesones**: formados por un *quark* y un *antiquark* (piones, kaones,...)
- **Bariones**: formados por tres *quarks* (protones, neutrones,...).
- Las partículas elementales pertenecen a dos grandes grupos: Los Fermiones y los Bosones.

Existen 6 tipos de *quarks*, cada uno con su sabor, su carga, su isospín débil y su masa (entre las propiedades más importantes). Una lista de estas propiedades para cada *quark* sería

Nombre	Símbolo	Generación	Isospín débil	Sabor	Carga	Masa (MeV/c <sup>2</sup> )
arriba (up)	u	1	$+\frac{1}{2}$	$I_z=+\frac{1}{2}$	$+\frac{2}{3}$	1,5 – 4,0
abajo (down)	d	1	$-\frac{1}{2}$	$I_z=-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{3}$	4 – 8
extraño (strange)	s	2	$-\frac{1}{2}$	S=-1	$-\frac{1}{3}$	80 – 130
encantado (charm)	c	2	$+\frac{1}{2}$	C=1	$+\frac{2}{3}$	1150 – 1350
fondo (bottom)	b	3	$-\frac{1}{2}$	B'=-1	$-\frac{1}{3}$	4100 – 4400
cima (top)	t	3	$+\frac{1}{2}$	T=1	$+\frac{2}{3}$	170900 ± 1800

Junto a los **leptones**, los *quarks* forman prácticamente toda la materia de la que estamos rodeados. En concreto la constituyen los dos primeros *quarks* ya que forman los protones y neutrones que a su vez forman los **núcleos atómicos**.



Poco tiempo después de que la existencia de los quarks fuera propuesta por primera vez en 1964, **Oscar W. Greenberg** introdujo la noción de la carga de color para explicar cómo los quarks podían coexistir dentro de algunos **hadrones** en **estados de otro modo idénticos** y todavía satisfacer el **principio de exclusión de Pauli**. El concepto resultó ser útil. La cromodinámica cuántica ha estado en desarrollo desde la década de 1970 y constituye un ingrediente importante en el **modelo estándar** de la física de partículas.

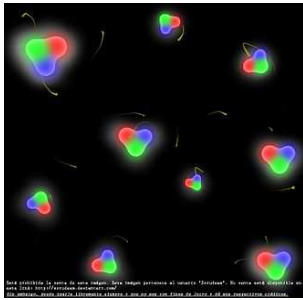
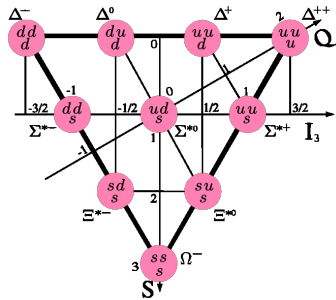


Figura 9.



La partícula  $\Omega^-$  está compuesta por tres quarks extraños(s), los tres con espín para arriba( $s = \frac{3}{2}$ ). Sin embargo, los quarks tienen espín  $\frac{1}{2}$  y debiesen obedecer el Principio de Exclusión de Pauli. ¿Cómo resolvemos esta contradicción?. Los quarks en la partícula  $\Omega^-$  están en distintos estados de color: blanco, azul y rojo.

CROMODINAMICA CUANTICA.

De esta manera se obtiene la tabla siguiente

Interacciones descritas por el Modelo Estándar junto con los grupos gauge y los bosones asociados a cada una de ellas. En la columna de la izquierda se representan las constantes fundamentales que indican la fuerza relativa de cada interacción.

Interacción	Grupo gauge	Bosón	Símbolo	Fuerza relativa
Electromagnética	U(1)	fotón	g	$a_{em} = 1/137$
Débil	SU(2)	bosones intermedios	$W^{\pm}, Z^0$	$a_{weak} = 1,02 \times 10^{-5}$
Fuerte	SU(3)	gluones (8 tipos)	g	$a_s(M_Z) = 0,121$

Según el modelo estándar toda la materia conocida esta constituida de partículas que tienen una propiedad intrínseca llamada **espín** cuyo valor es  $1/2$ . En los términos del modelo estándar todas las partículas de materia son **fermiones**. Por esta razón, siguen el **principio de exclusión de Pauli** de acuerdo con el **teorema de la estadística del spin**, y es lo que causa su calidad de *materia*. Aparte de sus **antipartículas** asociadas, el modelo estándar explica un total de doce tipos diversos de partículas de materia. Seis de éstos se clasifican como **quarks** (up, down, strange, charm, top y bottom), y los otros seis como **leptones** (electrón, muón, tau, y sus **neutrinos** correspondientes).

### Partículas fundamentales del Modelo Estándar

	Leptones		Quarks	
Familias	Nombre	Símbolo	Nombre	Símbolo
1 <sup>a</sup>	electrón	e	up	u
	neutrino e	$\nu_e$	down	d
2 <sup>a</sup>	muón	$\mu$	charm	c
	neutrino muón	$\nu_\mu$	strange	s
3 <sup>a</sup>	tau	$\tau$	top	t
	neutrino tau	$\nu_\tau$	bottom	b

### Three Generations of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass →	3 MeV	1.24 GeV	172.5 GeV	0
charge →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name →	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b><math>\gamma</math></b> photon
Quarks	6 MeV	95 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> gluon
Leptons	<2 MeV	<0.19 MeV	<18.2 MeV	90.2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b><math>\nu_e</math></b> electron neutrino	<b><math>\nu_\mu</math></b> muon neutrino	<b><math>\nu_\tau</math></b> tau neutrino	<b><math>Z^0</math></b> weak force
	0.511 MeV	106 MeV	1.78 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	$\pm 1$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>e</b> electron	<b><math>\mu</math></b> muon	<b><math>\tau</math></b> tau	<b><math>W^\pm</math></b> weak force

Bosons (Forces)

La teoría estándar de Gravitación es la Teoría de la Relatividad General de Einstein.

## Principio de Equivalencia:

Consideremos una partícula de masa  $m$  cayendo en un campo gravitacional, creado por otra masa  $M$ . De acuerdo a la segunda ley de Newton:

$$m_i \vec{a} = -G \frac{m_g M_g}{r^2} \hat{r}$$

Hay, en principio, dos tipos de masa,

- la masa inercial  $m_i$  que determina la aceleración de la partícula al aplicar cualquier fuerza
- La masa gravitacional  $m_g$  que mide la respuesta de la partícula a un campo gravitacional.  $m_g$  cumple el mismo rol que la carga eléctrica en electromagnetismo.

Experimentalmente:  $m_i = m_g$ ,  $M_i = M_g$

Esto implica que todas las partículas caen con la misma aceleración en un campo gravitacional. Este es el enunciado del Principio de Equivalencia.

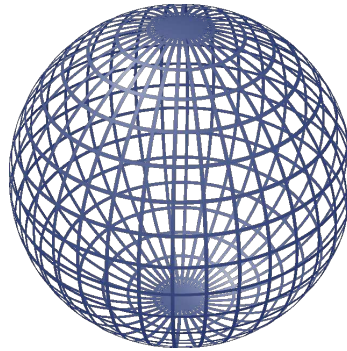
El Principio de Equivalencia hace posible la interpretación geométrica de la gravitación.

Además muestra que, localmente un campo gravitacional es equivalente a un sistema acelerado.

En Relatividad General, la fuerza de gravitación se manifiesta en la métrica del espacio-tiempo. La métrica del espacio tiempo es un tensor que determina la distancia entre dos puntos infinitamente cercanos en dicho espacio.

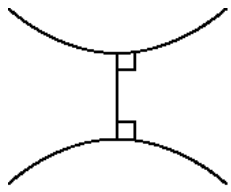
$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

Esta distancia representa el Teorema de Pitágoras para dos puntos separados por un infinitésimo  $dx^\mu$ . Sin embargo el Teorema de Pitágoras no es válido en general, para dos puntos separados por una distancia finita. Esto da lugar a las Geometrías No-Euclidianas.

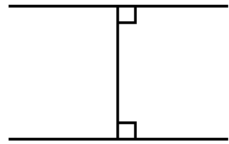


**Figura 10.**

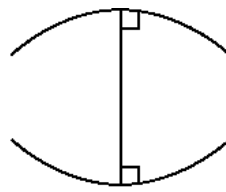
La esfera es un modelo de geometría elíptica bidimensional, los **meridianos** resultan ser **líneas geodésicas** mientras que los **paralelos** son líneas de curvatura no mínima.



Hyperbolic



Euclidean



Elliptic

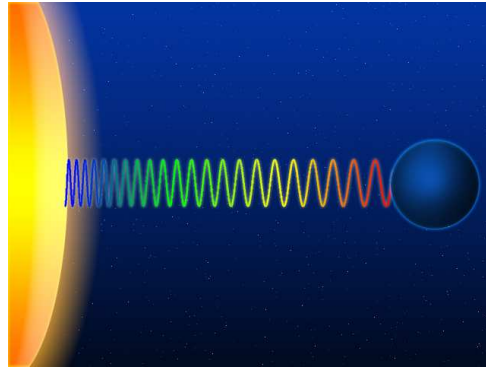
**Figura 11.**

Angulo entre paralelas para tres tipos de geometría

En RG la presencia de materia(y energía) modifica la geometría del espacio-tiempo, curvándolo.

Las partículas caen en un campo gravitacional siguiendo «la línea recta» de la geometría, llamada geodésica. La geodésica es la línea más corta entre dos puntos.

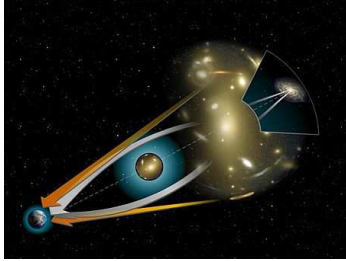




**Figura 12.**

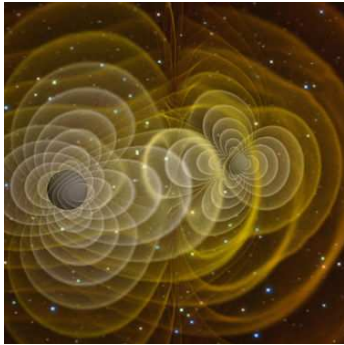
En la imagen se reproduce el corrimiento gravitacional hacia el rojo de un fotón que escapa del campo gravitatorio solar y se dirige hacia la Tierra. En este caso, la onda electromagnética pierde progresivamente energía y su frecuencia disminuye conforme aumenta la distancia al Sol.

El campo gravitacional afecta la medida del tiempo



**Figura 13.**

Lente gravitacional



**Figura 14.**

La solución en el vacío de la aproximación para campos gravitatorios débiles tiene una estructura similar a la *ecuación diferencial de ondas de d'Álembert*, de lo que se deduce que las perturbaciones de la métrica tienen una naturaleza ondulatoria y se transmiten a través del espacio-tiempo a la velocidad de la luz.