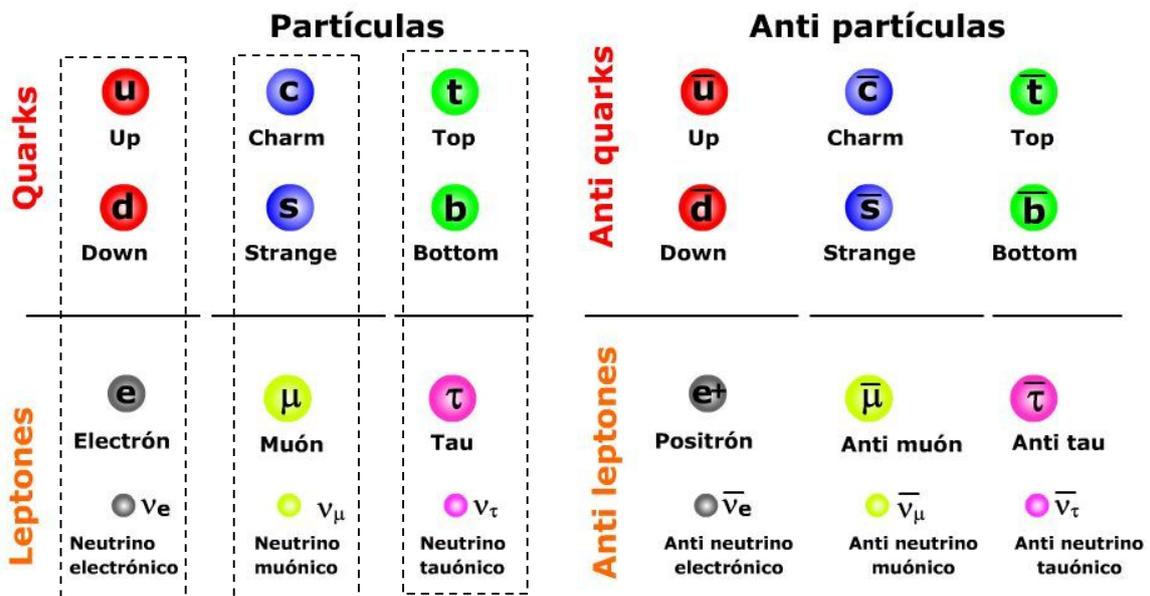


Actualmente sabemos que ni los protones ni los neutrones son partículas elementales, ya que en su interior existen estructuras más pequeñas llamadas **quarks**.

El esquema actualmente aceptado por la mayoría de los físicos, el llamado **Modelo Estándar (SM, de Standard Model)**, sostiene que **existen doce partículas elementales**, además de sus correspondientes **antipartículas**, las cuales podríamos decir que son los verdaderos átomos (en el sentido etimológico de la palabra: sin partes) y que pueden ser agrupadas según el esquema siguiente:



En resumen, sólo existen tres tipos de partículas elementales: **quarks**, **electrones** y **neutrinos**, que podemos agrupar en tres familias distintas (señaladas en la figura con rectángulos de puntos). De esta manera la materia que nos rodea está formada, exclusivamente, por partículas de la primera familia: **electrones**, **neutrinos electrónicos** y **quarks tipo u y d**.

Las partículas de las otras dos familias son idénticas a las de la primera, excepto en la masa, que es bastante superior (de ahí que tanto el muón como la partícula tau reciban el nombre genérico de "electrones pesados"). Todas ellas son inestables y terminan desintegrándose en partículas de la primera generación.

A los electrones, muones y tauones, y a sus correspondientes neutrinos, se les da el nombre genérico de **leptones** por ser las partículas ligeras de cada familia.

Todas las partículas mostradas tienen un espín 1/2 y son, por tanto, **fermiones** (fermiones= partículas con espín no entero). Los fermiones cumplen el Principio de Exclusión de Pauli: no puede existir dos en el mismo estado cuántico.

En física cuántica, el neutrino electrónico, el muónico y el tau son descritos como estados superpuestos.

La superposición en un instante y lugar dado nos da la probabilidad de qué tipo de neutrino puede encontrarse. Las probabilidades varían con el tiempo, **oscilan** (por el descubrimiento de las oscilaciones de los neutrinos se ha otorgado el Premio Nobel de Física 2105), y los neutrinos pueden presentarse en sus (tres) distintas identidades. Este comportamiento peculiar es debido a las diferencias en las masas de los diferentes neutrinos. Los experimentos indican que estas diferencias son muy pequeñas. También se estima que la masa de los neutrinos es muy pequeña, aunque nunca se ha medido directamente (para más información ver: <http://fisquiweb.es/PNob/PNobF15.htm>).

Además de los quarks y leptones el SM incluye **partículas mediadoras o transportadoras de las interacciones básicas**. Todas ellas son **bosones** (bosones= partículas con spin nulo o entero). La gravedad es la única interacción básica que el SM no incluye. La partícula mediadora de esta interacción, el gravitón, aún no ha sido detectada.

Los gravitones, fotones y gluones tienen masa nula, mientras que los bosones  $W^+$ ,  $W^-$  y  $Z^0$ , mediadores de la interacción débil, tienen una masa considerable (80-90 veces la del protón).

No obstante había un gran problema que resolver. **El SM solo funcionaba si todas las partículas mediadoras tuvieran masa nula**, pero los bosones implicados en la explicación de la interacción débil rompen esta norma. Los físicos hablan de una *ruptura de la simetría*.

**En 1964 Peter Higgs y François Englert y Robert Brout sugirieron un mecanismo mediante el cual se podían explicar los diferentes valores de las masas que presentan las partículas elementales: el campo de Higgs.**



P Higgs (en la mesa, segundo por la derecha) y F. Englert (tercero) durante una conferencia en la Univ. de Oviedo en 2013.

En el momento del Big Bang, las partículas no tenían masa y todas las fuerzas estaban unificadas en una sola fuerza primordial. El campo de Higgs, en estos primeros momentos (unos 10 s después del Big Bang), permeaba un universo perfectamente simétrico.

Este orden original ya no existe, la simetría se ha perdido. Algo pasó unos pocos segundos después del Big Bang. El campo de Higgs perdió su equilibrio original, rompió su simetría y encontró un nivel estable de energía en el vacío lejos de la simétrica posición inicial. Esta ruptura espontánea de la simetría también se denomina *transición de fase del campo de Higgs*; es como cuando el agua se congela y aparece el hielo.

**Una vez rota la simetría del campo de Higgs las distintas partículas empezaron a interactuar con él de forma distinta. Las partículas que interactúan muy intensamente con el campo adquieren una masa considerable, las que interactúan débilmente adquieren una masa menor, y las partículas que no interactúan con el campo de Higgs no adquieren masa (por ejemplo los fotones).** Si el campo de Higgs desapareciera repentinamente, toda la materia colapsaría. Nada de lo que conocemos existiría.

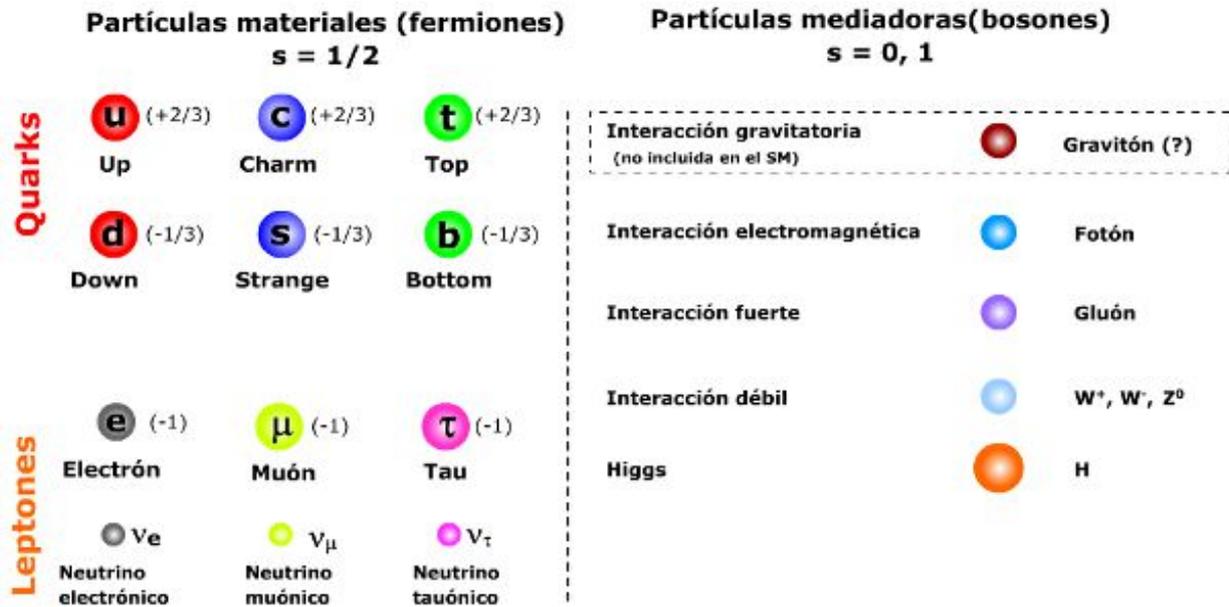
En la teoría de campos cada campo lleva asociado un bosón que es la partícula transportadora de las interacciones con el campo. **El bosón de Higgs (H)** sería la partícula mediadora asociada al fantasmal campo de Higgs. Su identificación, por tanto, sería una forma de confirmar la bondad de la teoría.

El bosón de Higgs fue detectada el 4 de julio de 2012 en el LHC (Suiza). Su masa es de unos  $126 \text{ GeV}/c^2$ .

Higgs y Englert (Brout había fallecido en 2011) recibieron el Premio Nobel de Física 2013 por *"el descubrimiento del mecanismo teórico que contribuye a la comprensión del origen de la masa de las partículas subatómicas"*. (Para más información: <http://fisquiweb.es/PNob/PNobF13.htm>).

Recapitulando todo lo dicho el Modelo Estándar incluye partículas materiales (fermiones) y partículas portadoras de las interacciones básicas (bosones), además del bosón de Higgs:

### Modelo Estándar (SM) de partículas

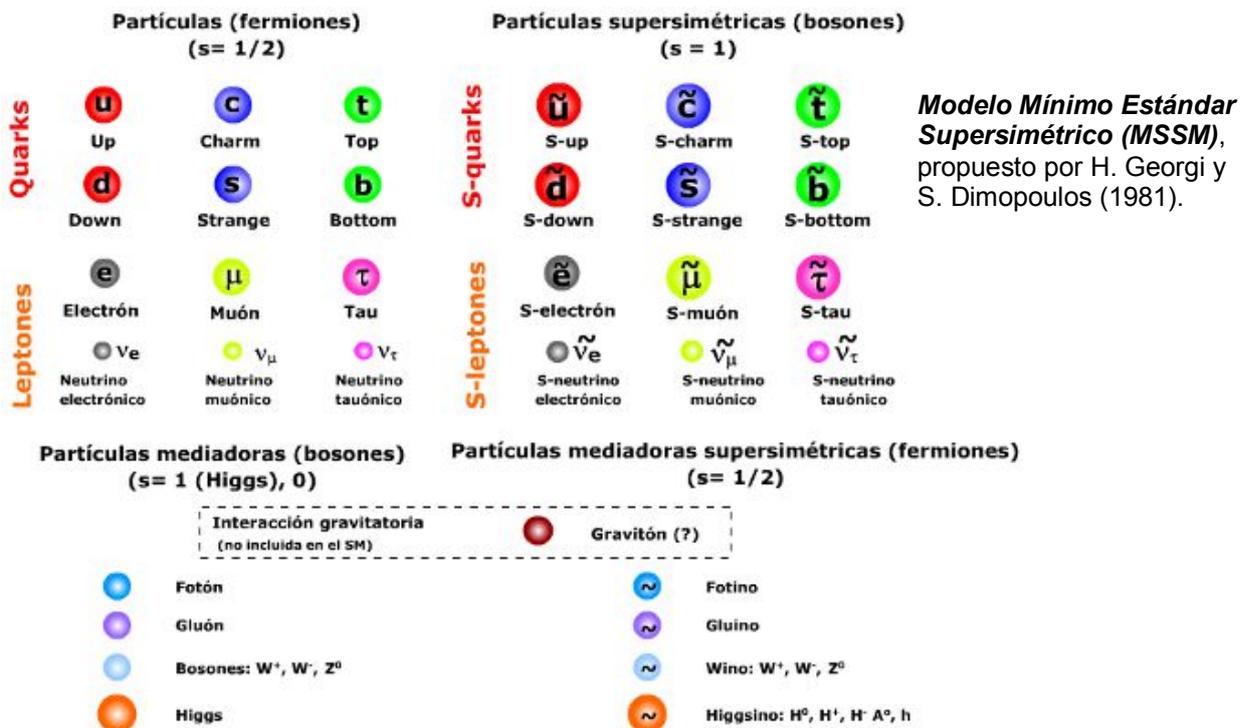


Según *la teoría de la Supersimetría* (conocida con el acrónimo SUSY, de SuperSYmmetry) a cada partícula del SM le correspondería una compañera supersimétrica con idéntica carga, una masa mayor y un spin nulo o entero, de tal manera que las correspondientes partículas supersimétricas son **bosones**, no fermiones. Los bosones no obedecen al Principio de Exclusión de Pauli.

SUSY predice la existencia de cinco bosones de Higgs

Las masas de las partículas supersimétricas están en el rango de los TeV, por lo que podrían ser identificadas en el LHC (que funciona en este rango de energías desde 2015), aunque hasta la fecha no ha sido anunciado dicho hallazgo.

Según SUSY la mayoría de las partículas supersimétricas serían inestables, pero las más ligeras podrían ser estables, por lo que se cree que *podrían ser las componentes de la materia oscura*.



### Los quarks

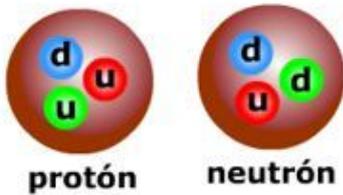
Existen seis clases de quarks (se dice que existen seis "sabores") y todos ellos **tienen carga fraccionaria**: los quarks **u, c y t** tienen carga **+2/3** (lo que significa que su carga es 2/3 la del electrón), mientras que los quarks **d, s y b** tienen carga **-1/3**.

El electrón y los "electrones pesados" tienen todos carga -1, y los neutrinos carecen de carga.

Los quarks, electrones y neutrinos interactúan débilmente y gravitatoriamente, pero sólo los quarks son sensibles a la interacción fuerte. Todos, excepto los neutrinos, son sensibles a la interacción electromagnética ya que poseen carga eléctrica.

Los quarks más pesados (**c, s, t y b**) tienden a desintegrarse en los más ligeros (**u y d**) por efecto de la fuerza débil. Lo mismo ocurre con el muón y la partícula tau que tienden a desintegrarse en electrones.

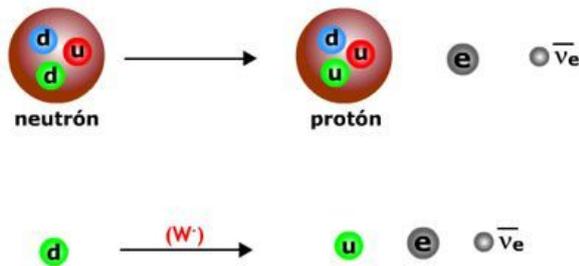
<b>u</b> q = +2/3 m = m <sub>u</sub> = 6 m <sub>e</sub>	<b>c</b> q = +2/3 m = 433 m <sub>e</sub>	<b>t</b> q = +2/3 m = 58 300 m <sub>e</sub>
<b>d</b> q = -1/3 m = 2 m <sub>e</sub>	<b>s</b> q = -1/3 m = 33 m <sub>e</sub>	<b>b</b> q = -1/3 m = 1 433 m <sub>e</sub>
<b>e</b> q = -1 m = m <sub>e</sub>	<b>μ</b> q = -1 m = 207 m <sub>e</sub>	<b>τ</b> q = -1 m = 3 478 m <sub>e</sub>
<b>ν<sub>e</sub></b> q = 0 m = 10 <sup>-5</sup> m <sub>e</sub>	<b>ν<sub>μ</sub></b> q = 0 m = 0,4 m <sub>e</sub>	<b>ν<sub>τ</sub></b> q = 0 m = 40 m <sub>e</sub>



Los protones y neutrones son, según este modelo, partículas formadas por la combinación de tres quarks.

Un protón está formado por dos quarks *up* y uno *down* (**uud**) y un neutrón por la combinación de un quark *up* y dos *down* (**udd**). De ahí que la carga eléctrica del protón sea: 2/3+2/3 - 1/3 = +1, mientras que la del neutrón: 2/3-1/3-1/3 = 0. Además el quark u es el más ligero de todos los quarks, mientras que el quark d es un poco más pesado. Esto puede explicar la estabilidad del protón frente a la del neutrón.

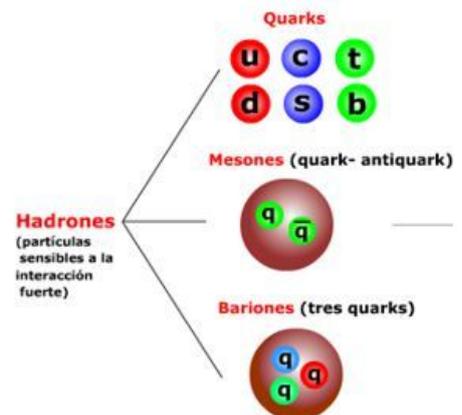
Existe la posibilidad de que un quark d se convierta en un quark u (más ligero), mientras que la transformación inversa necesita aporte de energía, razón por lo que es menos probable.



Además de los quarks existen sus correspondientes antipartículas, antiquarks, idénticas pero con la carga invertida (se representan con un barra horizontal sobre la letra correspondiente al sabor del quark). Las partículas formadas por la combinación de un quark y un antiquark reciben el nombre de **mesones**.

Tenemos, por tanto, dos clases de partículas formadas por quarks: aquellas que como el protón o el neutrón están formadas por la combinación de tres quarks, y a las que se les denomina de manera genérica **bariones**, y las formadas por la combinación quark-antiquark denominadas **mesones**.

Los bariones y los mesones, como los quarks, son sensibles a la interacción fuerte y se les da el nombre genérico de **hadrones**.



La existencia de carga eléctrica en las partículas da lugar a una fuerza entre ellas, la fuerza electrostática. Esta fuerza, según la ley de Coulomb, es intensa si se encuentran próximas y decae rápidamente cuando se alejan. Es la fuerza que mantiene ligados los electrones a los núcleos.

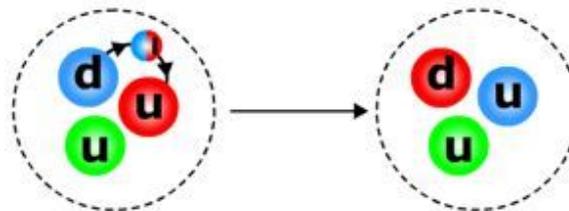
De manera análoga, y según la **cromodinámica cuántica**, la fuerza fuerte se manifiesta entre partículas que tengan lo que se denomina "**carga de color**". Esto es, entre los quarks. Existen tres cargas de color distintas, denominadas rojo, azul y verde. Los anti-quarks tienen el correspondiente anticolor.

**La combinación de quarks para formar bariones o mesones siempre se realiza de forma que el hadrón formado tiene una carga de color nula (color blanco).** Así en los bariones los tres quarks que los forman han de tener cada uno de ellos una carga de color distinta. Las tres cargas de color dan un color blanco para el barión (carga de color nula).

En un mesón la combinación del color y el anticolor del antiquark, también dan un color neutro o una carga de color nula.

**La carga de color de los quarks cambia continuamente en el interior de los bariones debido al intercambio de gluones.** Los gluones tienen carga de color. Portan un color y un anticolor.

En la imagen el quark d cambia de azul a rojo emitiendo un gluón que transporta el color azul y el antirojo (que se señala con una línea vertical). El gluón emitido es capturado por el quark rojo que pasa a tener carga azul. El resultado neto es un barión con color neutro.



**La interacción fuerte se hace muy pequeña a distancias cortas, mientras que crece rápidamente cuando dos partículas con carga de color (dos quarks) se alejan.** Esto hace que los quarks se comporten como partículas libres cuando se encuentran muy cerca (el diámetro de un protón es del orden de  $10^{-15}$  m, y el de un quark  $10^{-19}$  m), pero si tratamos de separarlos la fuerza entre ambos crece exponencialmente (libertad asintótica), haciendo imposible la separación. De ahí que no se conozcan quarks libres, sólo agregados en parejas o tríos.

**La interacción que mantiene ligados los nucleones (protones y neutrones) es una parte residual de la interacción fuerte existente entre los quarks que están en su interior.** Algo similar a las fuerzas de Van der Waals existentes entre las moléculas, que son interacciones intermoleculares debidas a la existencia de las cargas eléctricas de los átomos que las constituyen.

Sabores	Colores		
Up (u)	<span style="color:red">u</span>	<span style="color:blue">u</span>	<span style="color:green">u</span>
Down (d)	<span style="color:red">d</span>	<span style="color:blue">d</span>	<span style="color:green">d</span>
Charm (c)	<span style="color:red">c</span>	<span style="color:blue">c</span>	<span style="color:green">c</span>
Strange (s)	<span style="color:red">s</span>	<span style="color:blue">s</span>	<span style="color:green">s</span>
Top (t)	<span style="color:red">t</span>	<span style="color:blue">t</span>	<span style="color:green">t</span>
Bottom (b)	<span style="color:red">b</span>	<span style="color:blue">b</span>	<span style="color:green">b</span>