

### ¿De qué estamos hechos? El Modelo Estándar de Partículas Elementales

#### ¿De qué estamos hechos?

Todo lo que nos rodea está compuesto de **partículas elementales**, como los **quarks** que forman los **protones** y **neutrones** de los núcleos atómicos, y los **leptones**, como los **electrones** que orbitan alrededor. Juntos forman los átomos que componen la materia. Los quarks y leptones son partículas elementales: no están compuestos de partículas más pequeñas (hasta donde se ha podido explorar experimentalmente).

#### ¿Cómo se mantienen unidas las partículas?

Las partículas elementales ejercen y sienten fuerzas asociadas a **cuatro interacciones fundamentales**: el **electromagnetismo**, la **fuerza fuerte**, la **interacción débil**, y la **gravedad**. Cada una de estas interacciones tiene asociada una o varias partículas de fuerza, los **bosones gauge**: el **fotón**, los bosones **Z** y **W**, los **gluones** y el (todavía hipotético) **gravitón**.

#### FERMIONES: Los Ladrillos del Universo

Leptones spin = 1/2			Quarks spin = 1/2		
Nombre	Masa (GeV)	Carga eléctrica	Nombre	Masa (GeV)	Carga eléctrica
$\nu_L$ lightest neutrino*	$<10^{-9}$	0	<b>u</b> up	0.002	2/3
<b>e</b> electron	0.0005	-1	<b>d</b> down	0.005	-1/3
$\nu_M$ middle neutrino*	$<10^{-9}$	0	<b>c</b> charm	1.3	2/3
$\mu$ muon	0.1	-1	<b>s</b> strange	0.1	-1/3
$\nu_H$ heaviest neutrino*	$<10^{-9}$	0	<b>t</b> top	173	2/3
$\tau$ tau	1.8	-1	<b>b</b> bottom	4.2	-1/3

#### Bosones: El cemento del Universo

Unified Electroweak spin = 1		
Name	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
$\gamma$ photon	0	0
<b>W<sup>-</sup></b>	80.39	-1
<b>W<sup>+</sup></b>	80.39	+1
W bosons		
<b>Z<sup>0</sup></b>	91.188	0
Z boson		

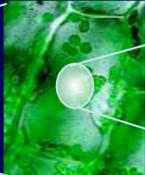
Strong (color) spin = 1		
Name	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
<b>g</b>	0	0
gluon		



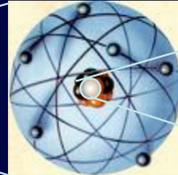
10<sup>5</sup>m = 100 Km  
Imagen satélite de Madrid, el bosque de El Pardo y la Sierra



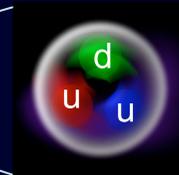
1m  
Una encina de el bosque de El Pardo



10<sup>-5</sup>m = 10 μm  
Célula vegetal



10<sup>-10</sup>m = 0.1nm  
Átomo de Carbono



10<sup>-15</sup>m  
Estructura interna del protón

### El misterio de la masa

De forma cotidiana denominamos masa a la cantidad de materia de un cuerpo. Prácticamente toda la masa de los átomos que componen la materia se debe a la masa de sus núcleos. La masa de los núcleos atómicos esencialmente corresponde a la de los protones y neutrones que los forman.

Sin embargo, la masa de un protón o un neutrón es mucho mayor que la suma de las masas de los quarks que los forman (éstas son tan pequeñas que sólo explican el 1% de la masa total). El 99% de la masa de protones y neutrones está asociada a la energía cinética de los quarks en su interior, que se mueven a velocidades relativistas, pero que no escapan por estar confinados por la fuerza de color. Esta masa corresponde por tanto a una energía interna de las partículas compuestas.

La energía interna no puede, sin embargo, explicar la masa de las partículas elementales (como los propios quarks, los leptones o los bosones Z y W), por no estar compuestos de partículas más pequeñas.

#### ¿Cuál es el origen de la masa de las partículas elementales?

### El vacío y el campo de Higgs

La existencia de masa para las partículas elementales se explica mediante el **campo de Higgs**. Un campo es una magnitud definida en cualquier punto del espacio y en cualquier instante del tiempo, como el campo eléctrico o el gravitatorio. El campo de Higgs es similar, pero con la diferencia de que tiene **valor no nulo en el vacío, que es constante en todo el espacio y el tiempo**, pero que no define ninguna dirección especial (se dice que es un campo escalar). El campo de Higgs forma parte de la estructura del **vacío** del Universo.

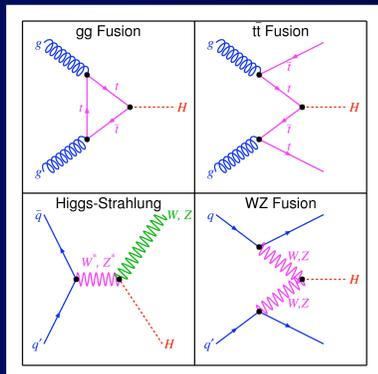
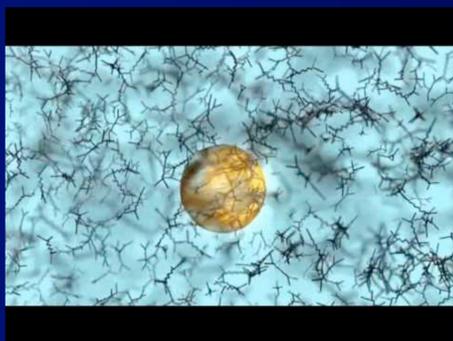
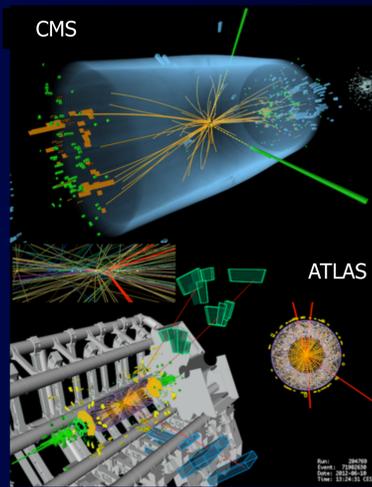
Las diferentes partículas tienen una interacción diferente con el campo de Higgs. Cuando una partícula se mueve en el vacío, en realidad se mueve a través del campo de Higgs, y su interacción con el campo de Higgs contribuye a su energía, incluso cuando está en reposo. Según la fórmula  $E=mc^2$ , esto corresponde a la masa en reposo de la partícula.

Una analogía es imaginar el campo de Higgs como un fluido, y la masa de la partícula como la resistencia o inercia de la partícula a moverse por su interacción con el campo de Higgs. La analogía ilustra bien algunas propiedades, aunque falla en que el campo de Higgs es invariante relativista, y a diferencia de un fluido de la experiencia cotidiana, no frena ni cambia el estado de movimiento de las partículas, ni define un sistema de referencia en reposo absoluto.

### El bosón de Higgs

La existencia del campo de Higgs conlleva una predicción. Concentrando suficiente energía en un punto, sería posible crear excitaciones del campo de Higgs. El cuanto del campo de Higgs es una partícula muy especial, denominada **bosón de Higgs**. Sus propiedades están determinadas de forma precisa en el modelo. Es una partícula de spin 0, y su interacción con cualquier otra partícula es proporcional a la masa de la partícula. El bosón de Higgs interactúa con el propio campo de Higgs y adquiere también su propia masa.

La partícula de Higgs ha sido descubierta en 2012, 48 años después de su predicción teórica en 1964. El **gran colisionador hadrónico LHC**, en el complejo del CERN en Ginebra, confirmó la existencia del bosón de Higgs el 4 de julio de 2012. Este descubrimiento llevó a François Englert y Peter Higgs a ser galardonados con el premio Nobel de Física en 2013 por el descubrimiento teórico del mecanismo responsable del origen de las masas de las partículas elementales.

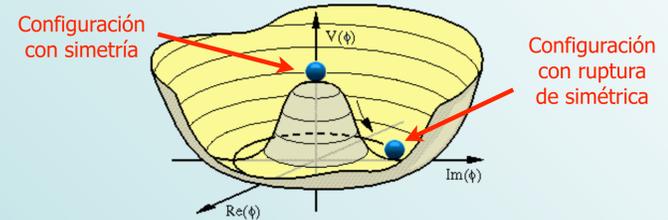


#### Ruptura espontánea de la simetría

Los mediadores de las interacciones débiles, los **bosones Z y W**, son las únicas partículas de interacción con masa, a diferencia de los fotones y los gluones.

La existencia de masa para los bosones Z y W está íntimamente ligada a la ruptura de una simetría (denominada electrodébil) que relaciona las interacciones electromagnéticas y débiles.

El mecanismo de Higgs es una descripción de una **ruptura espontánea de la simetría electrodébil**, y que tiene como consecuencia que los bosones Z y W adquieran masa, mientras que el fotón permanece sin masa.



#### LHC: el gran colisionador de hadrones

El LHC es un acelerador del CERN, en la frontera franco-suiza cerca de Ginebra. Hace circular protones por un túnel circular de 27km enterrado a 100m bajo tierra, los acelera a velocidades próximas a la de luz y los hace colisionar en el centro de sus detectores.

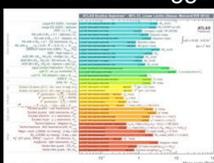
Los detectores ATLAS y CMS, de dimensiones descomunales pero de exquisita precisión, detectan los productos de las colisiones. Los millontes de Gigabytes de datos se analizan en una red de ordenadores distribuida en centros de investigación de todo el mundo.

Los resultados permiten deducir la existencia de la partícula de Higgs a partir de sus productos de desintegración. Actualmente continúa analizando las propiedades del bosón de Higgs, y busca las nuevas partículas a más altas energías.



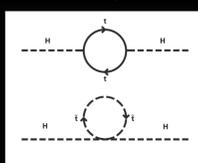
## Misterios por resolver

#### Más allá del Higgs



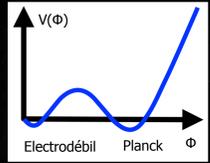
Las propiedades del bosón de Higgs medidas en el LHC concuerdan con la versión más sencilla del mecanismo de Higgs. Se continúan buscando indicios o detección directa de posibles nuevas partículas a esa escala de energías.

#### Jerarquía



La masa del bosón de Higgs es muchos órdenes de magnitud menor que otras escalas de la naturaleza, como la escala de Planck (que controla las interacciones gravitacionales). ¿cuál es el mecanismo responsable de esta enorme diferencia?

#### Estabilidad del vacío



La masa del bosón de Higgs medida por el LHC es tal que las correcciones cuánticas pueden desestabilizar el vacío. Como en un líquido sobrecalentado, se podrían nuclear burbujas con un valor del campo de Higgs próximo a la escala de Planck.

#### Las masas



El mecanismo de Higgs explica la existencia de la masa de las partículas elementales, pero no sus valores concretos. El origen de estos valores numéricos es aún misterioso...