

# Artículos

## ¿Qué es el campo de Higgs?

Héctor Vucetich\*

\* Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de la Plata

### 1. INTRODUCCIÓN

Desde la antigüedad, los hombres se han preocupado por comprender cómo está estructurada la materia que nos forma: ¿de qué estamos hechos los seres humanos, las rocas y las casas que nos rodean, las plantas, los animales y el mar?

Los filósofos presocráticos (los más parecidos al pensamiento moderno) trataron de dar respuestas racionales al problema. Tales supuso que era agua, que se transformaba por algún mecanismo en otras sustancias, Anaxímenes, el aire y Anaximandro, el *ápeiron*: una sustancia ilimitada, que era el origen de todas las formas de materia.

Pero fueron los atomistas, Leucipo y Demócrito, quienes propusieron que la materia estaba formada por corpúsculos pequeños, los *átomos*, todos formados por la misma sustancia pero que diferían en forma, tamaño y posición. Esta hipótesis, difundida por la filosofía de Epicuro y su discípulo Lucrecio, es muy similar a la moderna teoría atómica.



Figura 1: Leucipo y Demócrito: los creadores del atomismo. Fuente: Wikipedia

Esta última, inspirada en el atomismo griego pero guiada por el conocimiento de la química, fue propuesta por Dalton y desarrollada durante el siglo XIX. Como durante el siglo XVIII se habían encontrado numerosos elementos químicos, Dalton imaginó átomos para cada uno de ellos. Éstos, además de forma, tamaño (no especificados) y posición, poseían propiedades químicas y reglas fijas de composición que explicaban las leyes conocidas de la Química. Los desarrollos posteriores mostraron que también se podían explicar las leyes de los gases y la estructura de los sólidos.

Pero hacia fines del siglo XIX se descubrió que los átomos no eran "indivisibles" (ése es el significado de la palabra) sino que estaban a su vez constituidos por otras formas de materia llamadas *las partículas elementales*. Durante el transcurso del siglo XX se investigó la naturaleza de las mismas y se establecieron las leyes naturales que las rigen. En ese punto comienza nuestro relato.

## 2. LAS PARTÍCULAS ELEMENTALES

### 2.1 Campos y partículas

Ante todo, aclaremos que existen dos concepciones distintas acerca de las “partículas elementales”. En la primera, se considera que ellas son las formas fundamentales de la materia. En la segunda, se considera que existen otros objetos fundamentales: los *campos de materia* cuyas *excitaciones elementales* son las partículas elementales. En la primera concepción, los campos se consideran cantidades auxiliares, útiles para el cálculo, pero sin contraparte en la naturaleza. Aclaremos que la diferencia entre ambas es sólo filosófica: las ecuaciones y predicciones físicas de ambas concepciones son idénticas.



Figura 2: Campo y partícula. Fuente: Wikipedia/Water

Una comparación puede aclarar las cosas: imaginemos un estanque (o una palangana con agua). Podemos describir el estado del agua como una distribución continua del material: no hay saltos ni discontinuidades en la misma. Estamos describiendo en agua como un *campo*.

Pero si se arroja un pequeño objeto en el agua se desprenden gotas: éstas son semejantes a las partículas elementales, pues son excitaciones (porciones en movimiento) del campo.

En la primera concepción (las partículas son los objetos básicos) el estanque se considera un conglomerado de gotas y son éstas las que le dan forma. Como es costumbre en física, hablaremos de “partículas” aunque haya que pensar en “campos”.

		Three generations of matter (fermions)				
		I	II	III		
mass		2.4 MeV/c <sup>2</sup>	1.27 GeV/c <sup>2</sup>	171.2 GeV/c <sup>2</sup>	0	7 GeV/c <sup>2</sup>
charge		2/3	2/3	2/3	0	0
spin		1/2	1/2	1/2	1	0
name		<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>γ</b> photon	<b>H</b> Higgs boson
	Quarks	4.8 MeV/c <sup>2</sup>	104 MeV/c <sup>2</sup>	4.2 GeV/c <sup>2</sup>	0	
		-1/3	-1/3	-1/3	0	
		1/2	1/2	1/2	1	
		<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> gluon	
	Leptons	<2.2 eV/c <sup>2</sup>	<0.17 MeV/c <sup>2</sup>	<15.5 MeV/c <sup>2</sup>	91.2 GeV/c <sup>2</sup>	
		0	0	0	1	
		1/2	1/2	1/2	1	
		<b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	<b>Z<sup>0</sup></b> Z boson	
	Gauge bosons	0.511 MeV/c <sup>2</sup>	105.7 MeV/c <sup>2</sup>	1.777 GeV/c <sup>2</sup>	80.4 GeV/c <sup>2</sup>	
		-1	-1	-1	±1	
		1/2	1/2	1/2	1	
		<b>e</b> electron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau	<b>W<sup>±</sup></b> W boson	

Figura 3: Los constituyentes fundamentales de la materia. Fuente: Wikipedia/Quark

### 2.2. Los “campos de materia”

Comenzaremos estudiando a las “partículas” que forman los átomos, los electrones y sus parientes. La tabla muestra las características más importantes de las mismas.

Lo característico de estas partículas es que se agrupan en tres “familias”, formadas por dos *leptones* (de color verde en la figura 3) y dos *quarks* (de color violeta). Examinemos la primera familia, cuyos integrantes forman los átomos. Los quarks *u* y *d* forman los *nucleones* (*protones* y *neutrones*), que a su vez forman el núcleo del átomo. Los quarks están confinados dentro de los nucleones y no pueden escaparse. Los *electrones* forman la atmósfera del átomo: dan vueltas alrededor del núcleo como los planetas alrededor del Sol. La parte más externa de esa atmósfera, los *electrones de valencia*, es la que produce las uniones químicas. Dos átomos cercanos pueden intercambiar electrones y en el proceso quedan unidos.

Finalmente, los neutrinos son las partículas más raras de la familia: sólo interactúan débilmente con el resto de la materia, tanto que podrían atravesar una pared de plomo de un año-



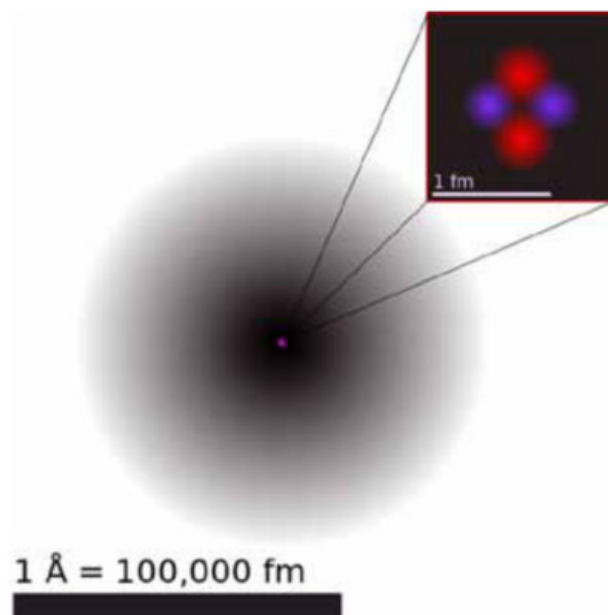


Figura 4: Esquema de un átomo de Helio, mostrando la estructura. Fuente: Wikipedia/Atom

luz de espesor sin ser detenidos. De hecho, los neutrinos se emiten copiosamente en el interior del Sol por las reacciones nucleares que producen la energía solar, y algo así como diez billones de neutrinos por segundo atraviesan cada centímetro cuadrado de nuestras personas sin causar daños. Para detectarlos es necesario realizar costosos experimentos en laboratorios subterráneos para evitar que sus escasas reacciones con la materia sean enmascaradas con las que producen otras partículas menos abundantes pero más activas.

## 2.3 Bosones y fermiones

Hagamos una pausa para explicar dos nociones muy importantes: la de *bosones* y *fermiones*.

Los fermiones son partículas elementales individualistas: les gusta estar solos y tienen una tendencia a mantenerse apartados los unos de los otros. Con más precisión: dos fermiones no pueden tener el mismo estado, un enunciado que se conoce como el *principio de exclusión de Pauli*. Es esta propiedad la que en buena parte es responsable de la *impenetrabilidad de la materia*: los electrones son fermiones, así como todas las partículas de las columnas I, II y III de la figura 3 y cuando dos cuerpos se ponen en contacto tratan de rechazarse entre sí.

Los bosones, en cambio, son partículas elementales gregarias: les gusta agruparse y proceder en grupo. Todas las partículas elementales de la cuarta columna de la figura 3 son

bosones. La tendencia a agruparse de los bosones se manifiesta como tendencia a ponerse en el mismo estado, una propiedad que se aprovecha en el láser: en este último aparato hay átomos excitados listos para emitir fotones que no se deciden a hacerlo. Pero cuando se pone dentro del aparato un fotón "semilla", los átomos emiten cada uno un fotón de las mismas características que la semilla, resultando así una radiación intensa y coherente característica.

## 2.4 Las interacciones

Los fermiones constituyen los ladrillos con que se forman los átomos, pero deben unirse con una argamasa: las interacciones fundamentales entre las partículas, que las mantienen unidas y le dan estabilidad a la materia.

Se conocen cuatro *interacciones fundamentales*, indicadas en la tabla 1. Están ordenadas por intensidad decreciente. Las correspondientes partículas elementales, los *bosones intermedios*, son bosones (¡obviamente!).

Las interacciones fuertes mantienen a los quarks confinados dentro de los nucleones. También generan las fuerzas que mantienen a los nucleones pegoteados dentro del núcleo. De esta manera se consigue una estabilidad relativa de la estructura nuclear.

Las interacciones electromagnéticas, las segundas en intensidad, son responsables de la estructura de la materia

“normal”: moléculas, rocas, bacterias, líquidos, gases... Las fuerzas fundamentales son los campos eléctricos y magnéticos, domados y dirigidos por la plasticidad de la “atmósfera electrónica” de los átomos. Las uniones químicas, las corrientes eléctricas, la piedra imán, la estructura de las proteínas... todas las propiedades de la materia están afectadas, cuando no producidas, por los campos electromagnéticos.

Finalmente, las interacciones débiles son responsables de la desintegración radiactiva de muchos núcleos atómicos.

Como ya dijimos, la luz solar se origina en reacciones nucleares que ocurren cerca del centro del Sol. La principal de esas reacciones, la *reacción p-p*, de produce por la acción de las interacciones débiles durante los choques entre protones. Muy de vez en cuando, durante uno de esos choques, un protón se transforma en neutrón (una reacción débil) y en ese proceso se libera energía en la forma de un fotón y un neutrino. Este último se escapa mientras que el fotón, después de vagabundear durante diez mil años en el interior del Sol, llega a la superficie transformado en luz visible que mantiene tibio a nuestro planeta.

¿Qué diremos de las interacciones gravitatorias? Estas últimas se mantienen orgullosamente aparte de las demás. Aunque muy débiles, son acumulativas y sus efectos son intensos en presencia de masas muy grandes, tales como la Tierra, la Luna o el Sol. Esta “aristocracia” entre las interacciones tiene hasta su propia teoría: la Relatividad General de Einstein, por ahora completamente separada de el Modelo Estándar que estamos esbozando.

## 2.5 El campo de Higgs

Finalmente, el director general de toda esta estructura es un extraño individuo que coordina tanto las masas de las partículas elementales como la intensidad de sus interacciones. Se trata del *campo de Higgs*, cuya detección en el año pasado motivó la redacción de esta nota.

El campo de Higgs es un objeto muy extraño. Su origen es oscuro y sus procedimientos para regular a las partículas parecen arbitrarios. Mientras que los campos “normales”, como el campo electromagnético, cuando están en reposo desaparecen, el campo de Higgs no desaparece sino que toma un valor finito (el *valor medio de vacío*) que mantiene a las demás partículas elementales en tensión.

Esa tensión puede explicarse con otra comparación. Si usted está corriendo en un parque con un estanque, le conviene correr alrededor del estanque. Si se mete en este último, fácilmente notará que no puede correr: sólo caminar con bastante lentitud. Mientras corre por el sendero que rodea al estanque, usted necesita apartar el aire para avanzar y eso se hace fácilmente, pero si se mueve en el agua tiene que apartarla y eso es mucho más difícil. Un hombre de 80 kg sumergido hasta el cuello debe apartar unos 80 kg de agua para dar un paso, mientras que en el aire sólo debe apartar unos 80 mg. La presencia del agua hace que la resistencia al movimiento aumente un millón de veces.

La presencia del campo de Higgs actúa como el agua: aumenta la resistencia a cambiar el estado de reposo o movimiento y la cantidad que mide esa resistencia es la *masa* del cuerpo. En las partículas elementales, es el campo de Higgs quien produce la masa.

Tipo	Intermediario	Símbolo
Fuerte	Gluón	$g$
Electromagnética	Fotón	$\gamma$
Débil	Mesones intermedarios	$W, Z$
Gravitatoria	Gravitón	—

Tabla 1: Las interacciones fundamentales

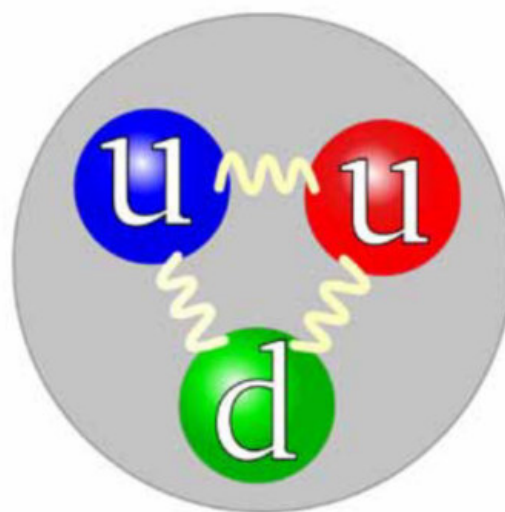


Figura 5: Estructura de quarks del protón. Fuente: Wikipedia/Quark



## 2.6 El origen de la masa

Aclaremos que aunque el campo de Higgs produce las masas de las partículas elementales no produce toda la masa de los cuerpos compuestos. En efecto, la famosa ecuación de Einstein

$$E=mc^2 \quad (1)$$

afirma que toda forma de energía almacenada en un cuerpo contribuye a su masa. Por eso, además de la masa de las partículas elementales hay otras contribuciones muy importantes a la masa de un cuerpo. El caso extremo son los protones y neutrones, cuya masa se debe casi toda al esfuerzo que hacen los gluones para que los quarks no se escapen.

Por ejemplo, dentro de un protón hay dos quarks  $u$  y un quark  $d$ , que están atados entre sí por varios gluones. Los quarks tratan desesperadamente de escapar y como resultado se mueven un trecho muy pequeño hasta que los gluones "tensan sus músculos" y los detienen. Este juego de correr y frenar, tensar y relajar, involucra una enorme energía que produce una masa gigantesca. La masa de un quark  $u$  es unas 5 veces mayor que la del electrón, la de un quark  $d$  unas diez veces mayor, ¡pero la masa del protón es dos mil veces mayor! Todo ese exceso de masa proviene de la energía empleada en la lucha entre quarks y gluones.

## 3 EL DESCUBRIMIENTO DEL BOSÓN DE HIGGS

¿Como es posible "descubrir" un objeto cuya existencia haya sido predicha por una teoría bien confirmada por el experimento? Lo que ocurre es que aunque una teoría haya sido "confirmada" por el experimento no necesariamente es "verdadera".

Una teoría se *confirma* si predice que determinado hecho va a ocurrir bajo ciertas circunstancias y ese hecho ocurre en esas circunstancias. La teoría se *refuta* si el hecho no ocurre. Finalmente, mencionemos que una teoría es *viable* si ha sido confirmada y es consistente con el resto de la ciencia confirmada.

Ahora bien, hay razones teóricas para rechazar la existencia de un campo "tipo Higgs", ya que su presencia introduce serias dificultades en la matemática de la teoría. Y, como es de esperar, hace muchos años que se investigan variantes del Modelo Estándar que no tengan tales dificultades. Como la presencia del campo de Higgs es notoriamente difícil de confirmar, se planearon durante años experimentos destinados a confirmar la presencia de "gotas" del campo de Higgs. Esas gotas se llaman el *bosón de Higgs*<sup>1</sup>.

### 3.1 El bosón de Higgs

Ya dijimos que el campo de Higgs genera las masas de todas las partículas elementales...incluyendo la del bosón de Higgs. Pero no es posible calcular el valor de la misma ni aún a partir de los datos observacionales obtenidos de otras partículas elementales porque el campo de Higgs actúa como un jefe orgulloso y distante, que produce las masas de sus subordinados (les indica qué trabajo hacer) pero no se digna a convivir con ellos y les oculta totalmente sus intimidades.

### 3.2 EL LHC



Figura 6: El túnel del LHC. Fuente: <http://home.web.cern.ch>

Para obtener noticias de estas intimidades (que no van a aparecer en un programa de "chimentos" por TV) es necesario observar un bosón de Higgs, que como es una gotita del campo, no sólo las conoce sino que las publica.

<sup>1</sup> O también *mesón de Higgs*.



Pero producir un mesón de Higgs es difícil y mucho más aún, detectarlo. Para producirlo es necesario hacer chocar dos protones de frente, de manera que exploten por la colisión y produzcan una "bola de fuego" gigantesca. La bola de fuego se enfría emitiendo toda clase de partículas elementales y entre ellas puede haber algunos bosones de Higgs<sup>2</sup>.

Para producir muchos choques poderosos, con inmensas bolas de fuego, lo mejor es hacer lo que no se debe hacer en una carrera de autos: usar dos pistas casi circulares, que se crucen en varios puntos, y no poner semáforos en los cruces. Y además, que los autos que corren por una pista lo hagan en un sentido opuesto a los que corren por la otra, de manera de cuando choquen lo hagan de frente. Esa es la idea detrás del acelerador de partículas más grande de la Tierra: el *Large Hadron Collider* conocido por su sigla *LHC*.

En este acelerador, las dos pistas corren en un túnel de 27 km de largo y a 175 m de profundidad, rodeadas de poderosísimos campos electromagnéticos que dirigen y aceleran a los protones. En cada uno de los cruces hay espectadores esperando los choques, entre ellos los experimentos ATLAS y CMS, que miden las mismas cantidades pero usando técnicas distintas para prevenir que los errores sistemáticos<sup>3</sup> alcen su fea cabeza e invaliden los resultados.

### 3.3 La firma del bosón de Higgs

Si usted necesita hacer algún trámite, debe firmar algún documento tanto en la administración pública como en la privada. De la misma manera, si en alguno de los choques se ha producido un bosón de Higgs es necesario que aparezca entre los productos de la explosión alguna característica que diga "Yo soy el bosón de Higgs y estuve aquí".

Puesto que en cada choque se producen muchísimas partículas de todas clases, la firma debe ser muy clara y

difícil de imitar. Los experimentos ATLAS y CMS se concentraron en dos firmas muy características: el bosón de Higgs puede desintegrarse emitiendo dos fotones (firma  $\gamma\text{-}\gamma$ ) o cuatro leptones (firma dorada  $4L$ ), que son tan adecuadas como es posible para identificarlo.

El 4 de julio de 2012 el CERN anunció el descubrimiento de una partícula elemental con características similares a las del bosón de Higgs. Lo que había parecido casi imposible había comenzado a realizarse.

### 3.4 La filiación

Además de una buena firma, la identificación de una persona requiere otras características: sus impresiones digitales, color de ojos, sexo o estatura. Lo que falta todavía hacer es ver si la filiación del bosón descubierto en el CERN tiene efectivamente las características del bosón de Higgs que predice el Modelo Estándar. Aunque los resultados preliminares parecen confirmar que se trata de un bosón de Higgs, falta mucho trabajo para llegar a afirmarlo. La determinación de esas propiedades es mucho más delicada que la simple presencia de la partícula y pueden transcurrir años antes de lograrlo.

## 4 CONCLUSIÓN

Desde Leucipo y Demócrito, los hombres han intentado esclarecer la estructura de la materia que nos forma. El descubrimiento del bosón de Higgs (si se confirma) cerró (cerrará) una etapa de dos mil quinientos años de investigación en el tema y, en cierto modo, aclaró el misterio de la materia, pues no existe ningún tema investigado en el laboratorio que no pueda explicarse usando el Modelo Estándar<sup>4</sup>.

Esperemos, entonces, que las próximas investigaciones no sólo confirmen la existencia del bosón de Higgs sino que también abran nueva puerta para investigar otros aspectos de mundo en que vivimos.

<sup>2</sup> Muy pocos, en realidad. En promedio, se produce un bosón de Higgs por cada mil millones de colisiones protón-protón. Es verdaderamente una partícula de "muy bajo perfil".

<sup>3</sup> Los errores sistemáticos son fallas en el diseño de un experimento o de uno de los instrumentos. Son recónditos y perversos: muchos de ellos han perseverado en arruinar bellas mediciones delicadas durante décadas.

<sup>4</sup> Por el momento, sólo los datos astronómicos y cosmológicos (y algún experimento inspirado por ellos) indican que el Modelo Estándar está incompleto.