

# **Física de altas energías**

por

**Myriam Mondragón**

Este es un capítulo separado que integra el libro

## **Fronteras de la Física en el Siglo XXI**

**Octavio Miramontes y Karen Volke** (Editores)

CopIt-arXives, 2013

México, D.F.

ISBN: 978-1-938128-03-5

©CopIt-arXives

<http://scifunam.fisica.unam.mx/mir/copit/TS0011ES/TS0011ES.html>

# Índice general

Myriam Mondragón	<b>Física de altas energías</b>	<b>1</b>
1.	Introducción . . . . .	1
2.	Altas energías . . . . .	2
3.	El Modelo Estándar de las partículas elementales . . . . .	3
	Renormalizabilidad . . . . .	5
	Interacciones fundamentales . . . . .	6
	Materia y anti-materia . . . . .	11
	Bosón de Higgs y renormalizabilidad . . . . .	11
	Materia oscura . . . . .	15
4.	Misterios sin resolver . . . . .	17
5.	Más Allá del Modelo Estándar . . . . .	18
	Más simetría . . . . .	18
6.	Fronteras de la física de altas energías . . . . .	25
	Frontera de la Energía . . . . .	25
	Frontera de la Intensidad . . . . .	26
	Frontera del Cosmos . . . . .	26
7.	Referencias . . . . .	27

# Física de altas energías

Myriam Mondragón, Instituto de Física, UNAM, México

## 1. Introducción

La física de Altas Energías estudia las componentes más pequeñas de la materia, sus bloques constitutivos, y sus interacciones. Algunas de las preguntas que se hace la física de altas energías son: ¿De qué está hecha la materia? ¿Qué la mantiene unida? ¿Por qué es nuestro Universo como es? Es decir, explora las preguntas más fundamentales de la naturaleza de nuestro Universo.

Desde la época de los griegos los humanos se han hecho estas mismas preguntas. Ellos introdujeron el concepto de átomo, al cual pensaban como el bloque más pequeño e indivisible de la materia. El siglo XX vio adelantos espectaculares en nuestro entendimiento de la física. Se entendió cómo es y se comporta la materia a las escalas más pequeñas, con la teoría de la mecánica cuántica. Se desarrolló la teoría de la relatividad, que nos dice que el espacio y el tiempo se deben considerar juntos y que hay una velocidad límite para la materia, que identificamos con la velocidad de la luz. Armados con estos conocimientos podemos explorar nuestro Universo en la distancia y en el tiempo<sup>1</sup>: las leyes de la física se cumplen en todo el Universo de igual manera. El hecho de que nada viaja más rápido que la velocidad de la luz nos permite, a partir de observaciones de objetos astronómicos muy lejanos, saber como era el Universo en épocas pasadas. Podemos estudiar objetos astrofísicos de gran tamaño, así como las componentes del núcleo atómico. En el siglo XX aprendimos también que el átomo no es indivisible, que está compuesto de un núcleo y una nube de electrones girando a su alrededor. Al unificar la mecánica cuántica y la teoría de la relatividad, P.A.M. Dirac predijo la existencia de anti-materia, en 1932 se encontró el primer positrón, la anti-partícula del electrón. Sin embargo todas las observaciones desde entonces apuntan a que hoy nuestro Universo está compuesto de materia, aunque se llegan a recibir algunas partículas de anti-materia del cosmos y se pueden crear en el laboratorio. Después se comprobó que el núcleo a su vez tiene componentes, los quarks. Ya se conocían los electrones y se descubrieron los neutrinos.

---

<sup>1</sup>Ver el capítulo "Un Universo en evolución" de Vladimir Avila, en este mismo libro.

A lo largo de la segunda mitad del siglo XX, se elaboró y corroboró con gran precisión el Modelo Estándar de las partículas elementales, que constituye hasta ahora la teoría más exitosa para describir las componentes fundamentales de la materia y sus interacciones.

A finales del siglo XX se descubrió que los neutrinos tienen masa, que aunque es muy pequeña, implica una primera desviación del Modelo Estándar. Por otro lado, las observaciones astrofísicas indicaban desde los 1930's que había una discrepancia entre la materia luminosa observada y las curvas de rotación de las galaxias, que F. Zwicky explicó postulando que existe un tipo de materia no interactuante o no luminosa llamada materia oscura. ¿Cómo encaja todo esto? ¿Cuál es la relación entre lo más grande y lo más pequeño? ¿Por qué física de *altas energías*?

## 2. Altas energías

Para ver objetos o partículas necesitamos luz cuya longitud de onda sea similar al tamaño del objeto que deseamos observar. Por ejemplo, para ver los objetos que nos rodean necesitamos luz "normal" con longitudes de onda que van aproximadamente de 350 a 790 nm (nanómetros). ¿Pero qué sucede cuando queremos ver algo mucho más pequeño? Necesitamos aumentar nuestros sentidos, es decir, amplificar la señal a una que podamos ver. Ejemplos clásicos son un microscopio y un telescopio. En su experimento donde logró "ver" el núcleo de los átomos, Rutherford hizo chocar partículas  $\alpha$  (núcleos de Helio) contra una lámina de oro. Registró la trayectoria de las partículas después de chocar contra la lámina de oro y se dio cuenta que algunas de ellas pasaban sin problemas, sin embargo un número considerable eran deflectadas en dirección opuesta a la incidente, porque chocaban contra el núcleo del átomo. Así determinó la existencia del núcleo atómico y desarrolló el modelo atómico de Rutherford. En la física moderna de partículas elementales hacemos algo similar, pero a muy altas energías. Cuando queremos "ver" algo muy pequeño necesitamos longitudes de onda muy pequeñas o frecuencias muy grandes, es decir necesitamos energías muy altas. Para alcanzar estas energías necesitamos acelerar partículas a velocidades relativistas, cercanas a la de la luz. Después las hacemos chocar y vemos que resulta de las colisiones. Esto es algo parecido a la idea original de Rutherford, excepto que lo que se hace colisionar son dos haces de partículas moviéndose en direcciones opuestas. Al chocar, las partículas interactúan unas con otras de diversas maneras produciendo otras partículas, que pueden ser diferentes de las originales. En todo el proceso, la energía total se conserva, así que de partículas ligeras muy energéticas podemos producir partículas más masivas pero más lentas, esto gracias a la famosa relación entre masa y energía  $E = mc^2$ .

Esta es una caricatura de lo que sucede en un colisionador de partículas, como el Large Hadron Collider (LHC por sus siglas en inglés). Lo que se registra después de una colisión son las trazas que los productos de la colisión deja y su energía. De ahí se puede reconstruir que clase de partículas fueron producidas, si se extrae toda la información de

las partículas ya conocidas se pueden hacer descubrimientos de nuevas partículas y sus propiedades. Sobra decir que se usan métodos de detección y de análisis computacional muy sofisticados. El desarrollo de los colisionadores de partículas lleva consigo un gran desarrollo tecnológico. Un ejemplo muy conocido es el desarrollo del *world wide web* en CERN, que se usó en un principio para que los físicos asociados a las grandes colaboraciones pudieran comunicarse de una manera eficiente. Otros ejemplos son los desarrollos en tecnología, que van desde terapias contra el cáncer, procesamiento de imágenes para medicina, esterilización de alimentos, desarrollo de superconductores, desarrollo de cables multifilamentarios y fuentes de radiación de sincrotrón, hasta desarrollo de software y estimulación del cómputo paralelo y distribuido, por mencionar sólo algunos. Pero el estudio de los componentes de la materia y sus interacciones fundamentales, constituye ante todo, un enorme desarrollo cultural [1].



Figura 1: Una vista aérea del CERN, con las circunferencias de los aceleradores sobrepuestas, de 27 y 7 km respectivamente. Fuente: CERN

### 3. El Modelo Estándar de las partículas elementales

El Modelo Estándar (ME) de las partículas elementales se fue construyendo a través de una interacción entre la consistencia matemática de la teoría y los resultados experimentales desde mediados del siglo pasado [2–6]. La última confirmación del ME se hizo con el descubrimiento de una nueva partícula consistente con un bosón, la cual apunta a

ser el bosón de Higgs del Modelo Estándar, en julio de 2012 [7, 8]. Para entender lo que esto significa hay que estar consciente de que el ME ha sido confirmado antes en muchos experimentos a una precisión impresionante.

El marco matemático en el cual se encuentra descrito el ME es la teoría cuántica del campo [9–13]. La teoría cuántica del campo es la extensión relativista de la mecánica cuántica que describe a las partículas como excitaciones o cuantos de un campo (como el eléctrico o magnético) y que además toma en cuenta que el número de estas partículas puede cambiar en un proceso. ¿Cómo sucede esto? La experimentación nos dice que en algunos procesos unas partículas pueden decaer (transformarse) en otras, pero también nuevas partículas pueden ser creadas.

Se sabe que la invariancia de un sistema, descrito por un Lagrangiano, ante ciertas transformaciones está relacionado con la conservación de alguna cantidad física. O dicho de otra manera, a cada simetría global continua del sistema le corresponde una cantidad física conservada. Este es el teorema de Noether, formulado por la matemática austriaca Emmy Noether, que se cumple tanto en los sistemas clásicos como en los cuánticos. La invariancia ante rotaciones nos da la conservación del momento angular, la invariancia ante traslaciones en el espacio implica la conservación del momento y la invariancia ante las traslaciones en el tiempo implica la conservación de la energía. Por otro lado debemos considerar también a las simetrías internas del sistema, que son las que no están relacionadas a transformaciones del espacio-tiempo.

Un principio fundamental en las teorías del campo, tanto clásicas como cuánticas, es la invariancia de norma (gauge invariance). Este principio de invariancia de norma está basado en el hecho de que la física no debe depender de cómo describamos los parámetros internos del sistema. Una transformación de norma toma en cuenta los posibles cambios a estas configuraciones; al aplicar la transformación de norma al Lagrangiano éste debe quedar invariante. El teorema de Noether también se cumple aquí y la invariancia de norma global implica cantidades conservadas. En teoría cuántica del campo las transformaciones de norma se representan como cambios de fase que multiplican al campo. Una transformación de fase global cambia la fase de la misma manera en todos los puntos del espacio-tiempo. La cantidad conservada asociada a este cambio global de fase son las cargas, por ejemplo la carga eléctrica.

En el caso de las transformaciones de norma locales, la fase es una función de las coordenadas del espacio-tiempo. Al realizar la transformación de norma, para que el Lagrangiano permanezca invariante ante ésta, es necesario modificar la derivada convencional por una “derivada covariante”, que incluye el término de derivada ya conocido más un nuevo término. Este último representa la interacción del campo original (el que estamos transformando) con un nuevo campo vectorial, multiplicado por una constante que representa la intensidad de la interacción. Este nuevo campo se conoce como “campo de norma” y es un campo bosónico. Así, la invariancia ante transformaciones de norma locales implica una interacción.

La invariancia de norma local se puede ver también desde un punto de vista geométri-

co. Para definir la fase del campo debemos definir un marco de referencia local respecto al cual medimos esta fase. La invariancia de norma local refleja el hecho de que las propiedades físicas del sistema no pueden depender de nuestra elección del marco de referencia. Es, en cierto sentido, una extensión del principio de relatividad a las simetrías internas. En este caso también hay corrientes conservadas asociadas a la invariancia ante la transformación, pero el tratamiento es mucho más sutil y no se traduce en observables físicas.

Un ejemplo ilustrativo de una teoría de norma lo ofrece la electrodinámica cuántica, que es la teoría que incorpora la mecánica cuántica con la relatividad especial (QED por sus siglas en inglés). El campo en este caso representa partículas cargadas de espín  $1/2$ . La invariancia ante una transformación de norma global implica la conservación de la carga eléctrica a través de una corriente conservada. La invariancia ante una transformación de norma local implica la existencia de un campo vectorial de interacción, el campo electromagnético, cuyo cuanto es el fotón. La constante de acoplamiento entre el campo del fotón y los otros campos es la carga eléctrica. El grupo de norma en este caso es  $U(1)$ .

Estas transformaciones locales de norma se pueden generalizar a grupos de simetría más complicados, dando como resultado la existencia de cargas conservadas y las interacciones entre los campos a través de bosones de norma. El ME tiene la simetría global de Poincaré, que es la invariancia ante simetrías traslacionales y rotacionales y la invariancia de Lorentz, es decir todas las simetrías de una teoría relativista. Además incluye las simetrías internas del sistema descritas por las teorías de norma. Lo que se conserva en un proceso de partículas elementales son las cantidades asociadas a las simetrías del sistema, tanto espacio-temporales como internas.

## Renormalizabilidad

Un aspecto importante de una teoría cuántica del campo, para que describa la física correctamente, es la renormalizabilidad [14, 15]. La teoría cuántica del campo se describe perturbativamente, tomando en cuenta las fluctuaciones cuánticas del campo a escalas de distancia muy pequeñas o, lo que es lo mismo, a momentos o energías muy grandes. En la visión moderna de la física, la renormalizabilidad parametriza la sensibilidad de la física de bajas energías a la física de altas energías. En este sentido, las teorías renormalizables son teorías efectivas, válidas a ciertas escalas de energía. Al hacer un experimento en física de altas energías, por ejemplo la medida de una masa o un acoplamiento, el resultado dependerá de la energía del centro de masa a la que se hizo el experimento. Esto se debe a que a diferentes energías aparecen diferentes correcciones cuánticas del campo, similar a la polarización de una carga eléctrica en el vacío. Al hacer el cálculo aparecen términos que divergen, es decir su valor se va a infinito, sin embargo estos términos pueden ser reabsorbidos (regularización) para dar una cantidad finita, ajustando los parámetros a sus valores físicos. La renormalización, previa regularización, toma en cuenta las correcciones de tal manera que el resultado sea siempre una cantidad finita, redefiniendo los parámetros de la teoría para que tengan una dependencia con la energía. Al conjunto de ecuacio-

nes diferenciales que describen como varían los parámetros del sistema con la energía se le conoce como grupo de renormalización. El ME es una teoría del campo renormalizable y en ella hay un número infinito de divergencias que no pueden ser reabsorbidas con un número finito de parámetros, por lo tanto siempre hay cantidades infinitas y la predicción total no es posible. La gravedad cuántica es una teoría del campo no-renormalizable.

## Interacciones fundamentales

En la mecánica cuántica las partículas se distinguen en dos grupos: los bosones que tienen espín entero y los fermiones que tienen espín semi-entero. Las propiedades estadísticas de bosones y fermiones son muy diferentes. Los bosones siguen la estadística de Bose-Einstein y se pueden agrupar en un mismo estado cuántico, mientras que los fermiones siguen la estadística de Fermi-Dirac, donde dos partículas con los mismos números cuánticos no pueden estar en un mismo estado. Como ya mencionamos, en la teoría cuántica del campo las interacciones entre partículas se describen mediante el intercambio de otras partículas, conocidas como los “mediadores” de la fuerza. En el ME todas las partículas elementales que conforman la materia son fermiones, mientras que todas las partículas elementales que median o llevan la fuerza son bosones.

Las interacciones fundamentales que se conocen hasta ahora son la electromagnética, la débil, la fuerte y la gravitatoria. Se consideran fundamentales porque no se pueden escribir en términos de otras interacciones. La fuerza electromagnética y la de la gravedad son de alcance infinito y tienen una intensidad que decae con el cuadrado de la distancia. Sin embargo, no se tiene una teoría cuántica de la gravedad, que implicaría la existencia de un bosón mediador de la misma, o gravitón. Debido a que no hay una teoría cuántica de la gravedad y la masa de las partículas es muy pequeña comparada con la de los objetos macroscópicos, el ME no incluye a la gravedad.

Como ya se mencionó, un principio fundamental en el ME es la invariancia de norma (gauge), el grupo de norma del ME es  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$  [16]. El grupo  $SU(3)$  es el grupo que corresponde a la interacción fuerte. El producto de  $SU(2) \times U(1)$  corresponde a la simetría electrodébil. Cada uno de estos grupos lleva asociado una constante, llamada constante de acoplamiento de norma que corresponde a la intensidad de la interacción.

## Fuerza electrodébil

¿Cuáles son las propiedades la fuerza electrodébil? El bosón asociado con la fuerza electromagnética es el fotón, que no tiene masa ni carga eléctrica. El rango de esta fuerza es infinito y decae con el cuadrado de la distancia, similar a la gravitatoria pero 32 ordenes de magnitud más intensa. La fuerza débil es mediada por los bosones  $W^\pm$ , que tienen carga eléctrica y  $Z$ , que es neutro. A diferencia del fotón los bosones  $W^\pm$  y  $Z$  son masivos. Por esta razón, la fuerza débil es de corto rango, alrededor de  $1 \times 10^{-16}$  m. A bajas energías, la fuerza electromagnética y la débil se describen con modelos diferentes, las masa cero



del fotón y las masas de los  $W^\pm$  y  $Z$  hacen que estos modelos tengan un aspecto diferente. Cuando la energía asociada a la masa de las partículas  $W^\pm$  y  $Z$  ( $M_W c^2$ ,  $M_Z c^2$ ) es pequeña comparada con la energía de los procesos a considerar, la fuerza débil y la electromagnética se pueden describir con un sólo modelo y por lo tanto están unificadas [6]. En el Universo temprano, conforme la temperatura del Universo disminuyó pasó por una transición de fase, la simetría electrodébil se rompió y las partículas adquirieron masa.

La fuerza débil es quiral. El concepto de quiralidad está relacionado con el de helicidad. La helicidad de una partícula es la proyección del espín en la dirección de movimiento, así, una partícula puede ser izquierda o derecha. Aunque la helicidad y la quiralidad sólo son lo mismo en el caso de partículas sin masa, el concepto de helicidad ayuda a entender intuitivamente el concepto de quiralidad. En la teoría del campo la quiralidad es una propiedad intrínseca de las partículas que está relacionada con las transformaciones izquierdas y derechas bajo el grupo de Poincaré. La quiralidad de la interacción débil se manifiesta en el hecho que sólo las partículas izquierdas y las anti-partículas derechas la sienten.

### Fuerza fuerte, quarks y gluones

La fuerza fuerte es mediada por los gluones, que tienen carga de color, pero no carga eléctrica. Como su nombre lo indica, es la más intensa de las fuerzas fundamentales. Esta fuerza es de muy corto alcance.

Los núcleos atómicos están compuestos de partículas, a las que hasta ahora no se les ha visto estructura y se consideran fundamentales. Estas se llaman quarks (por la novela de James Joyce "Finnegan's Wake") y tienen propiedades peculiares. Los quarks tienen una propiedad o número cuántico llamado color. No tiene que ver nada con los colores que observamos con nuestros ojos (o las longitudes de onda que perciben nuestros ojos), es simplemente un nombre para una carga conservada. En los experimentos para explorar el interior de los núcleos atómicos se hizo evidente que los quarks tenían un número cuántico que puede tomar tres estados diferentes, y que las partículas compuestas de quarks, bariones y mesones, se encuentran siempre en una combinación neutra de este estado. Por eso se les acordó dar los nombres de los colores primarios.

Los quarks no se encuentran aislados, están siempre confinados al interior del núcleo atómico. Esto se debe a que la fuerza de color, o fuerza fuerte, aumenta con la distancia, a diferencia de la fuerza electromagnética. Este comportamiento es parecido al de la fuerza de un resorte. Sólo que en el caso de los quarks esta fuerza es tan intensa, que al separar un par quark anti-quark es energéticamente más favorable crear otros pares quark anti-quark del vacío que se acoplan a los quarks originales, que separar los quarks originales. A esta propiedad se le llama confinamiento. La fuerza fuerte, como su nombre lo indica, es la más intensa de las fuerzas fundamentales, pero de muy corto alcance. Su alcance es aproximadamente el tamaño del hadrón, es decir unos pocos femtometros ( $10^{-15}$  m). Los mediadores de la fuerza fuerte son los gluones (por glue, pegamento en inglés). Los

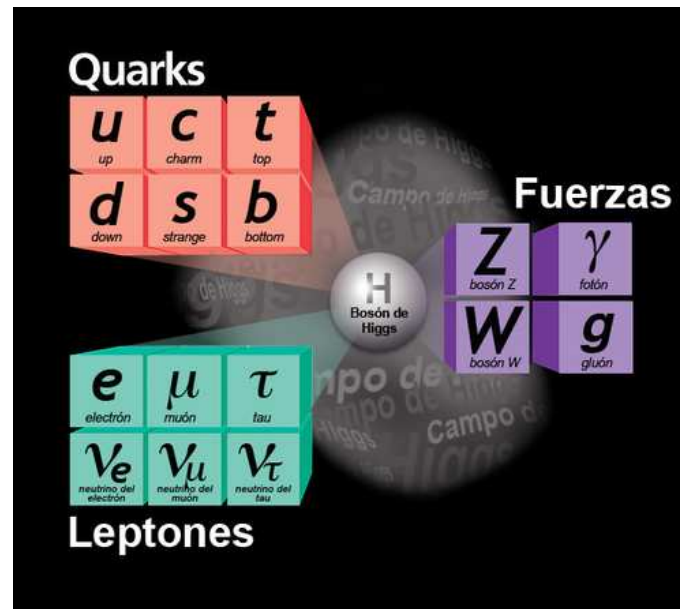


Figura 2: En la figura se muestran los quarks y leptones que conforman la materia, los bosones intermedarios que llevan las interacciones y el bosón de Higgs. Fuente: Fermilab.

gluones tienen también carga de color e interactúan con los quarks mediante la fuerza fuerte. Esto es otra vez diferente que en el caso de la fuerza electromagnética, donde los fotones no tienen carga eléctrica. A la teoría matemática que describe la interacción entre los quarks y gluones se le conoce como cromodinámica cuántica o QCD por sus siglas en inglés (quantum chromodynamics) [17]. En los procesos donde intervienen quarks éstos nunca aparecen aislados como ya dijimos, sino que al chocar e interactuar los quarks y gluones forman chorros o jets de hadrones.

Hay dos tipos fundamentales de quarks: up y down. Los quarks tienen carga eléctrica, por lo tanto, sienten la fuerza electromagnética. Los hadrones, que se clasifican en bariones (fermiones compuestos por tres quarks) y mesones (bosones compuestos por dos quarks), siempre tienen carga eléctrica que es un múltiplo entero de la carga del electrón. El neutrón y el protón son bariones, los quarks constitutivos del primero son udd y del segundo uud. Del hecho que el neutrón tiene carga eléctrica cero y el protón +1 sabemos que los quarks individuales tienen carga eléctrica fraccionaria, los tipo u tienen carga  $2/3$  y los tipo d  $-1/3$ . El decaimiento de neutrón a protón en el decaimiento nuclear nos dice que el neutrón se transforma en protón y emite un electrón y un anti-neutrino del electrón. Dado que el neutrón está constituido por quarks esto nos dice, a un nivel más fundamental, que un quark down se convirtió en un quark up, por el intercambio de un bosón vectorial  $W^-$ , el cual después decae en el electrón y su anti-neutrino. Esto es una

prueba clara de que los quarks también sienten la fuerza débil.

Los quarks tipo up y down forman dobletes de la interacción electrodébil. Hay tres copias o familias de estos dobletes, las cuales se distinguen sólo por su masa: up-down, charm-strange y top-bottom. A los seis diferentes quarks se les asigna una etiqueta llamada "sabor". Un quark de un sabor puede transformarse (decaer) en otro sabor mediante el intercambio de un bosón vectorial  $W$ , es decir por medio de la interacción débil.

### Plasma de quarks y gluones

Se necesitan procesos extremadamente energéticos para poder ver a los quarks como partículas aisladas. Al inicio del Universo, apenas unas millonésimas de segundos después del Big Bang, los quarks y gluones se encontraban libres en un medio muy denso conocido como el plasma de quarks y gluones. La temperatura crítica para que exista el plasma de quarks y gluones es de alrededor de  $2 \times 10^9$  grados (centígrados o Kelvin no hace diferencia en este caso), que es como 100,000 más caliente que el núcleo del nuestro sol. Conforme se enfrió este plasma, unos microsegundos después del Big Bang, los quarks se empezaron a confinar y a formar los protones y neutrones.

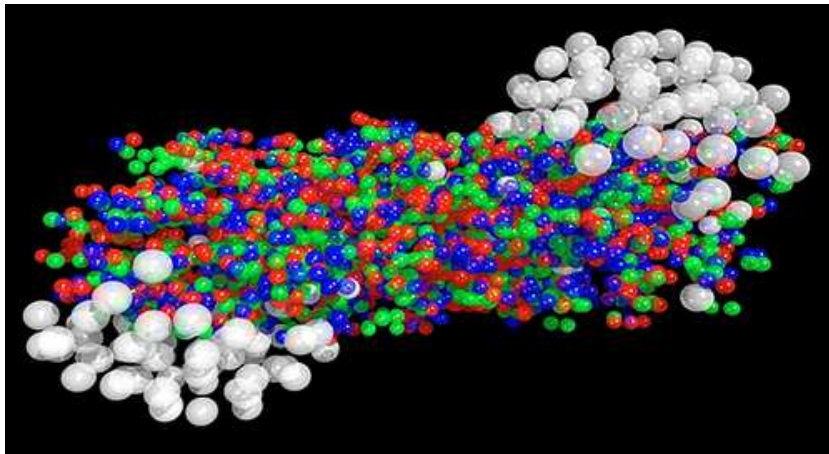


Figura 3: Plasma de quark y gluones. Fuente: CERN.

### Leptones

Los leptones son también fermiones y forman, junto con los quarks, toda la materia conocida. Los leptones también vienen en seis variedades o "sabores" y pueden ser cargados, como el electrón, o neutros como los neutrinos. Los leptones cargados y neutros forman dobletes electrodébiles. Al igual que en el caso de los quarks, los leptones cargados y los neutros de diferentes dobletes se distinguen sólo por su masa.

Los dobletes de quarks up-down y leptones electrón- $\nu_e$  forman lo que se conoce como la primera generación de materia. La segunda está conformada por los quarks charm-strange y los leptones muón- $\nu_\mu$  y la tercera generación la forman los quarks top-bottom y los leptones tau- $\nu_\tau$ . En la figura 2 se muestran las tres generaciones de quarks y leptones y los bosones intermediarios.

Los dobletes electrodébiles tienen las mismas interacciones, y en principio, serían intercambiables si tuvieran la misma masa. En este caso la simetría del sabor sería exacta. Sin embargo, los quarks pueden decaer en otros quarks y los neutrinos pueden cambiar de un tipo a otro. A la parte de la física de partículas elementales que se ocupa de estudiar las interacciones entre las distintas generaciones se le conoce genéricamente como “física del sabor”, y a los procesos de decaimiento y transformación de un tipo de fermión a otro se le conoce como cambios de sabor. La información de las masas y mezclas (procesos que cambian el sabor) de los quarks está contenida en la matriz unitaria CKM (Cabibbo-Kobayashi-Maskawa). La información equivalente para los neutrinos se encuentra en la matriz PMNS (Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata). Estas matrices parametrizan la diferencia entre el estado cuántico que participa en las interacciones electrodébiles y el estado cuántico que describe a la partícula propagándose libremente (estado de masa), que es una superposición de diferentes sabores.

En la naturaleza se observa una pequeña violación de la simetría de carga-paridad (CP). La simetría CP es la acción conjunta del cambio de signo en la carga y el cambio de signo en las coordenadas espaciales (paridad). Para poder tener violación de CP en los quarks y leptones es necesario tener tres generaciones de materia. Así, la violación de CP está incluida en la matriz de CKM, aunque ésta no predice su magnitud.

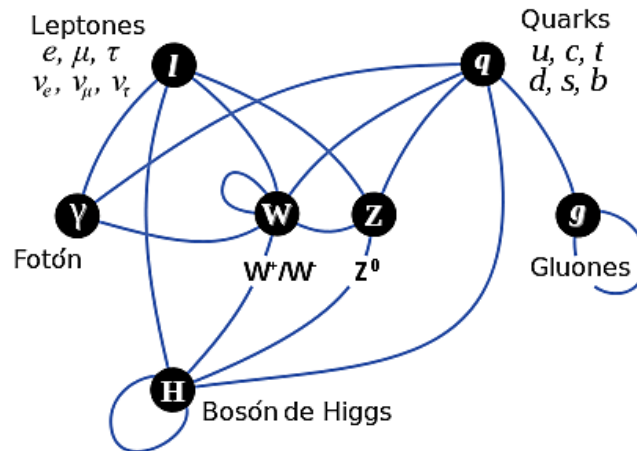


Figura 4: Las interacciones entre las partículas elementales.

## Materia y anti-materia

A cada partícula de materia le corresponde además su anti-partícula, que tiene todos los números cuánticos opuestos, pero la misma masa. La existencia de las anti-partículas la predijo P.A.M. Dirac al desarrollar su teoría relativista de la mecánica cuántica. En 1932, en un experimento de rayos cósmicos hecho por C.D. Anderson, se encontraron los anti-electrones y se les llamó positrones. Cuando una partícula y su anti-partícula chocan se aniquilan y lo que queda son rayos gamma (fotones ultra-energéticos) u otros pares partícula y anti-partícula. Una pregunta obligada es por qué hay más materia que anti-materia en nuestro Universo. Nos llegan partículas de anti-materia del cosmos, pero en una cantidad muchísimo menor que las de materia. También las podemos producir en el laboratorio, pero de las observaciones astrofísicas podemos inferir que el Universo está hecho principalmente de lo que llamamos materia y no de anti-materia. A este se le conoce como el problema de bariogénesis, o la creación de bariones (materia) en el Universo. Para poder explicar como se llegó a esta asimetría se necesita tener un sistema fuera de equilibrio, una asimetría inicial entre materia y anti-materia, así como una violación de la simetría de carga y paridad (CP). Estas se conocen como las condiciones de Sakharov para generar bariogénesis. Aunque el modelo de Sakharov explica de manera elegante la bariogénesis no hay suficiente asimetría bariónica o violación de CP en el ME para poder explicar la dominancia de materia sobre anti-materia en nuestro Universo.

## Bosón de Higgs y renormalizabilidad

Previo a la introducción del bosón de Higgs no hay manera de explicar la masa de las partículas elementales [18–20]. Un término explícito de masa en el Lagrangiano para los bosones vectoriales, los mediadores de las interacciones, viola la invariancia de norma. Sin embargo, se sabía que la fuerza débil es de corto alcance, así que los bosones vectoriales debían de ser masivos. El campo de Higgs es indispensable para entender como adquieren masa todas las partículas del ME, así como garantizar la estabilidad y consistencia de la teoría. Esto sucede mediante el rompimiento espontáneo de la simetría electrodébil. El rompimiento espontáneo de una simetría se refiere al hecho de que las ecuaciones de movimiento de Lagrangiano pueden exhibir ciertas simetrías, pero al minimizar el sistema respecto a la energía, existen soluciones que no son invariantes bajo estas mismas simetrías.

El Higgs es un bosón escalar y se incorporó a la teoría del campo de las partículas elementales en analogía con los superconductores en estado sólido. El potencial de Higgs en el ME tiene forma de fondo de botella o de sombrero (el famoso “sombrero mexicano” en la literatura). Tiene un mínimo local en el centro, que es metaestable, y una línea continua de mínimos alrededor de un círculo que es el fondo del sombrero, ver figura 6. El mínimo del potencial puede estar sobre cualquier punto de este círculo. En el momento en que se minimiza el potencial, el valor esperado del vacío (vev) del campo de Higgs es diferente

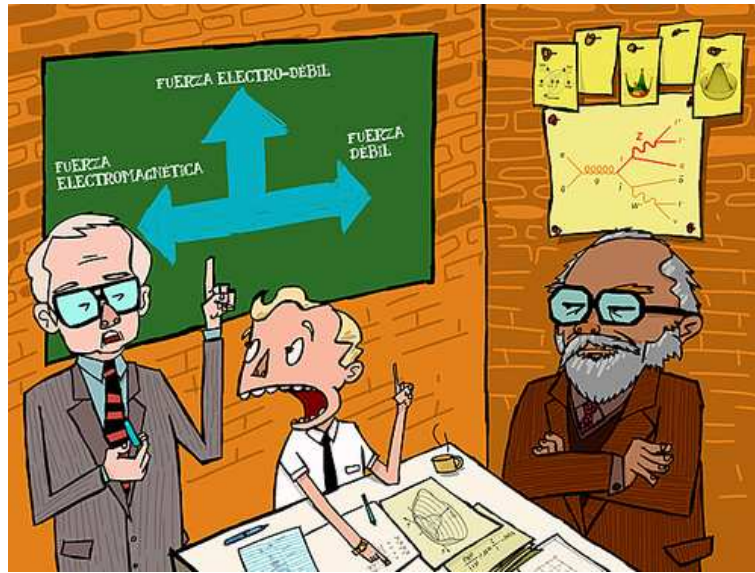


Figura 5: S. Weinberg, S. Glashow y A. Salam recibieron el Premio Nobel de física en 1979, por la formulación de la teoría electrodébil. Fuente: Rey Mico.

de cero y corresponde a un punto sobre este círculo. La simetría rotacional que existía en el mínimo metaestable se rompió espontáneamente al minimizar el potencial, cuando el vev del Higgs adquiere un valor particular. Al desarrollar el potencial del campo de Higgs alrededor del mínimo, aparecen términos cuadráticos en los campos  $W^\pm$  y  $Z$ . Estos términos corresponden a la masa de los bosones vectoriales, que son proporcionales a las constantes de norma y al vev del campo de Higgs. A la teoría de las interacciones electrodébiles se le conoce también como modelo de Weinberg-Glashow-Salam, por sus proponentes, que recibieron el Premio Nobel en 1979, después del descubrimiento de las corrientes neutras en 1973.

Una predicción de las teorías de norma acopladas a un campo escalar es precisamente la masa de los bosones vectoriales, encontrada en CERN por las colaboraciones UA1 y UA2 en 1983. El descubrimiento de los  $W^\pm$  y  $Z$  fue un indicio fuerte de que la descripción teórica de las interacciones fundamentales como teorías de norma con un campo escalar (Higgs) era la correcta.

Por otro lado, el campo de Higgs se acopla a los quarks a través de una constante llamada acoplamiento de Yukawa. Al minimizar el potencial la masa de los quarks resulta proporcional al vev del Higgs por el acoplamiento de Yukawa. El campo de Higgs tiene un término de auto-interacción, que resulta en un bosón escalar con masa, el bosón de Higgs, después del rompimiento de la simetría electrodébil.

El valor esperado del vacío (vev) del Higgs se puede inferir a través de las masas



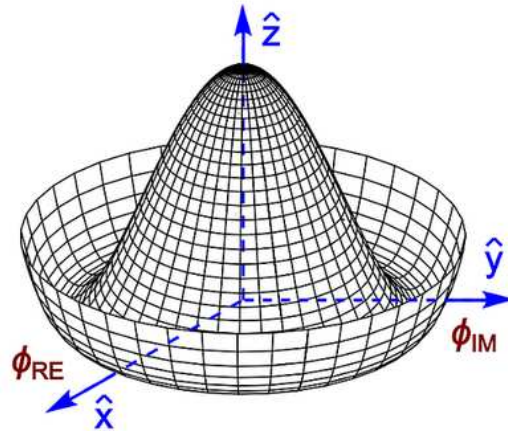


Figura 6: Potencial de Higgs en el Modelo Estándar.

de las partículas, y resulta ser 246 GeV. La masa de los bosones de norma  $W^\pm$  y  $Z$  es de alrededor de 91 y 80 GeV respectivamente. Sin embargo, la escala fundamental es la de Planck  $10^{19}$  GeV, es decir el valor medido de las masas de los bosones vectoriales es aproximadamente 16 ordenes de magnitud más pequeño que la escala fundamental. Por otro lado, las masas de las partículas elementales también varían mucho entre sí, no son del mismo orden de magnitud. A esta discrepancia de ordenes de magnitud entre los parámetros físicos de una teoría se le conoce como un problema de naturalidad.

Todas las partículas reciben correcciones radiativas (correcciones cuánticas), que se pueden calcular a diferentes escalas de energía mediante el grupo de renormalización mencionado previamente. Para los fermiones y bosones vectoriales, las correcciones radiativas varían logarítmicamente con la energía. Sin embargo, para los bosones escalares, como el bosón de Higgs, las correcciones radiativas aumentan cuadráticamente con la energía. Esperaríamos que la masa del bosón de Higgs fuera del orden de la masa de los  $W^\pm$  y  $Z$ , como parece ser el caso. Sin embargo, las correcciones radiativas empujan a la masa a un valor muy grande. Para que la masa física sea del orden de 100 GeV, debería haber una cancelación entre la masa a nivel árbol (la parte sin correcciones radiativas) y las correcciones radiativas, es decir dos números muy grandes se cancelan para dar uno pequeño. Al problema de la estabilización de la masa del Higgs se le conoce como el problema de la jerarquía, implica un ajuste fino en los parámetros de la teoría. El problema de la jerarquía está relacionado con el de naturalidad ya que, con la física que conocemos hasta ahora, involucra discrepancias grandes entre los parámetros (masas en este caso) de las partículas, además de un ajuste fino. Sin embargo, el problema de la estabilización de la masa del Higgs podría tener una solución sin ajuste fino en una nueva teoría que involucre procesos físicos hasta ahora desconocidos. Esta nueva teoría podría también ser no-natural, en el sentido de que los parámetros físicos no son del mismo orden de magni-

tud. En este sentido, es la estabilización de la masa del Higgs lo que nos apremia a buscar teorías más allá del ME, que pueden o no cumplir con el criterio de naturalidad.

Recientemente se ha encontrado una partícula consistente con el bosón de Higgs del ME en las colaboraciones CMS y ATLAS en CERN [7, 8]. La masa de este bosón es de alrededor de 126 GeV. Este es justo el rango de masa más probable de un análisis global de las medidas de precisión [21].

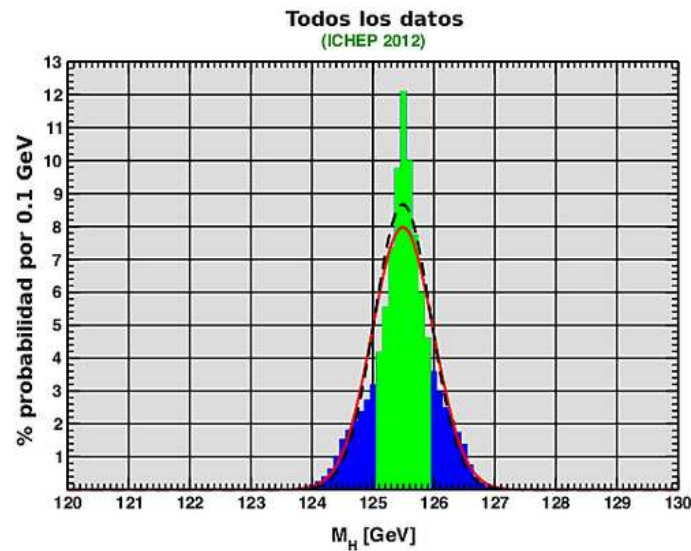


Figura 7: Ajuste de todas las medidas que involucran al bosón de Higgs para extraer el valor más probable de su masa. Ver [21].

## El problema de las masas

La masa de los fermiones varía mucho, el quark más ligero, el up, tiene una masa de aproximadamente 2.3 MeV, mientras que el top, el más pesado y con los mismos números cuánticos, tiene una masa de  $\sim 173$  GeV, es decir cinco ordenes de magnitud de diferencia. La masa del electrón, el leptón cargado más ligero, es de  $\sim 0.511$  MeV y la del tau es de  $\sim 1.78$  GeV, cuatro órdenes de magnitud más grande. Este es el problema de jerarquía pequeño o problema de la jerarquía de masas. Por otro lado, los neutrinos, que se pensaba tenían masa cero, en realidad tienen una masa pequeña, pero diferente de cero. En el caso de los neutrinos, lo que se ha medido hasta ahora en los experimentos es la diferencia de las masas al cuadrado entre pares de neutrinos. De estas cotas se puede deducir que el neutrino más pesado no puede tener una masa menor a 0.04 eV. Se tiene además una cota cosmológica que pone una cota superior a la suma de la masa de los neutrinos de 1 eV.



Esto significa que hay otros cinco ordenes de magnitud entre el neutrino más pesado y el electrón, lo cual hace el problema de la jerarquía de masas aún mas pronunciado.

Una explicación de lo pequeño de la masa de los neutrinos, es que los neutrinos adquieran su masa por el mecanismo del subibaja (seesaw en inglés). Esto implica la existencia de partículas muy masivas que no han sido observadas, neutrinos derechos. Los neutrinos, como su nombre lo dice, tienen carga eléctrica nula. Por ser neutro, cabe la posibilidad de que los neutrinos sean sus propias anti-partículas. Si este es el caso, se dice que es un neutrino de Majorana, si no, se dice que es un neutrino de Dirac. Si el neutrino es una partícula de Majorana podemos suponer que además de los neutrinos izquierdos podría haber neutrinos estériles derechos, que no participan en la interacción débil. El mecanismo de subibaja supone la existencia de por lo menos dos neutrinos derechos muy masivos. La diagonalización de la matriz de masas de los neutrinos hace que los estados físicos, los eigenvalores de la matriz de masas, sean dos neutrinos muy masivos y otro muy ligero, que sería el observado. Entre más masivos los derechos más ligeros los izquierdos, de ahí el nombre de subibaja.

Un problema abierto en la física de partículas es por qué los hadrones tienen mucha más masa que la suma de las masas de sus quarks constituyentes. La suma de la masa de los quarks constituyentes de un protón o neutrón es apenas un 1 % de su masa total. Se supone que la dinámica de la interacción fuerte es responsable de la masa de los hadrones, sin embargo el mecanismo exacto se desconoce.

## Materia oscura

La propuesta de una clase de materia no interactuante fue hecha por Jan Oort y posteriormente Fritz Zwicky alrededor de 1930, para explicar la discrepancia entre la masa estimada a partir de las curvas de rotación de las galaxias y la inferida a través de la luminosidad. Para que las curvas de rotación observadas sean consistentes con la masa de las galaxias hay que agregar una componente de materia no visible. Este tipo de materia no emite ni absorbe luz o radiación electromagnética, o si lo hace es a un nivel mínimo, y su única interacción significativa es la gravitatoria, por esta razón se le llamó materia oscura [22]. También a escalas mayores se observa la necesidad de suponer la existencia de materia oscura para explicar la dinámica de objetos astronómicos grandes, como los cúmulos de galaxias, donde se infiere que la mayor parte de la masa proviene de la materia oscura. A lo largo de los años la evidencia a favor de la hipótesis de materia oscura ha aumentado: análisis de las velocidades de los miembros de los cúmulos de galaxias, imágenes de las lentes gravitacionales, así como las observaciones del cúmulo Bala (Bullet cluster), entre otros. El cúmulo Bala es en realidad dos cúmulos colisionando y la observación de este objeto indica la existencia de dos tipos de materia, la ordinaria, que interactúa entre sí frenando el movimiento en direcciones opuestas y que produce emisión en rayos X, y otro tipo de materia que no interactúa y cuyas componentes en cada cúmulo se atraviesan, ver figura 8.

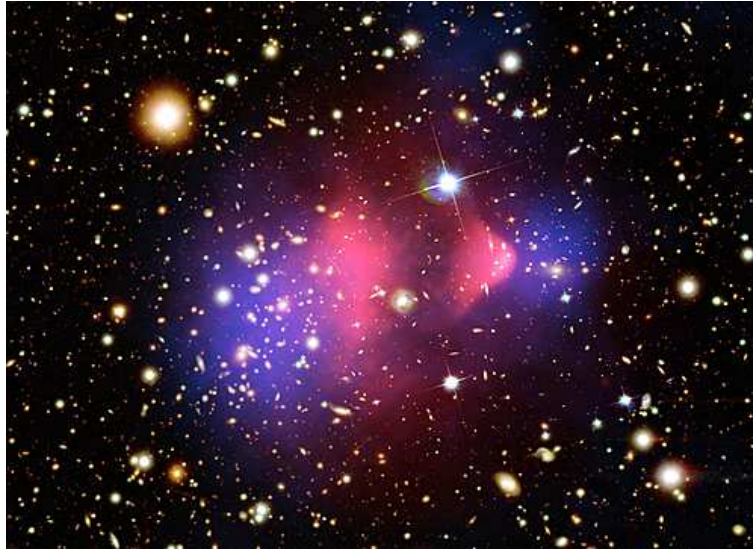


Figura 8: El Bullet cluster, la parte roja representa la materia visible o bariónica y la azul la materia oscura. Fuente: NASA.

La primera pregunta que surge a partir de la observación de la materia oscura es si ésta puede ser una de las partículas ya conocidas o alguna partícula aún no detectada en los laboratorios terrestres. Para determinar que clase de partícula podría ser la materia oscura se divide en tres tipos, dependiendo de su masa e interacciones: fría, tibia o caliente. La materia oscura caliente se supone ultra-relativista, con una masa muy pequeña, el candidato evidente es el neutrino. Sin embargo, la formación de estructura del Universo a pequeña escala no se puede explicar con materia oscura caliente como única componente. Por otro lado la materia oscura fría es pesada y no-relativista y las predicciones que se hacen para la formación de estructura del Universo concuerdan en general con las observaciones astronómicas. La materia oscura tibia tiene propiedades que son una mezcla entre las de la fría y la tibia. Se pueden considerar también modelos mixtos de materia oscura fría y caliente. En estos casos la cantidad de materia oscura caliente puede ser sólo un pequeño porcentaje del total.

La hipótesis más favorecida por las observaciones actuales es que la materia oscura es fría y consiste de partículas masivas débilmente interactuantes (WIMPs por sus siglas en inglés). Sin embargo, ninguna de las partículas del ME puede ser candidato a materia oscura fría, de manera que tendría que ser una nueva o nuevas partículas hasta ahora no descubiertas.

Por otro lado existen propuestas de que la materia oscura como partícula no existe, sino que la teoría de la gravedad Newtoniana debe ser modificada para escalas muy grandes. A estas teorías se les conoce como teorías MOND (Modified Newtonian Dyna-

mics) [23]. Sin embargo, las teorías MOND no pueden ser reconciliadas con las observaciones del cúmulo Bala. En el cúmulo Bala, la materia visible se ve en rayos X y la materia oscura se infiere a partir de lentes gravitacionales. Los efectos de las lentes son más fuertes en dos regiones separadas cerca de las galaxias visibles, de acuerdo con la hipótesis de que la mayor parte de la masa se encuentra en forma de un halo de materia oscura alrededor de la galaxia. En teorías de gravedad modificada el efecto de las lentes estaría concentrado en la parte visible de la galaxia, lo cual no se observa.

La materia oscura constituye el 23 % de la masa total del Universo, la materia visible (galaxias y gas intergaláctico) constituye el 4.6 % y el resto de contenido de energía del Universo se encuentra en la llamada “energía oscura” [24]. La hipótesis de energía oscura surgió de la observación de que nuestro Universo se está expandiendo aceleradamente. Hasta ahora no se sabe con certeza que es lo que produce esta expansión. Entre las propuestas mejor aceptadas están las siguientes: que existe un término de constante cosmológica  $\Lambda$ , la cual es una densidad de energía constante intrínseca al espacio y constante en el tiempo, o los modelos de campos escalares y quintaesencia, que pueden variar de intensidad en el tiempo. Aunque la hipótesis de constante cosmológica es la más favorecida y constituye parte de lo que se conoce como el modelo cosmológico  $\Lambda$ CDM, la diferencia entre el valor esperado de las medidas cosmológicas y el calculado a partir de modelos de partículas elementales es inmensa. El valor esperado a partir de cálculos de la energía del vacío en el ME es aproximadamente 120 ordenes de magnitud mayor que el necesario para explicar la expansión del Universo [25, 26].

#### 4. Misterios sin resolver

El ME tiene 19 parámetros cuyo valor no se puede inferir de la teoría, sino que se determina a través del experimento. Estos parámetros incluyen a las masas de las partículas (sin contar las masas de los neutrinos), los acoplamientos de norma y de Yukawa, los elementos independientes de la matriz CKM, la fase que viola CP y el valor esperado del vacío del Higgs. El valor de estos parámetros varía con la energía, pero a una energía específica su valor es el mismo. Es decir, son un conjunto de parámetros constantes a una energía dada.

¿Qué nos dicen el problema de la jerarquía y la multitud de parámetros arriba mencionados del ME? ¿Que es incorrecto? Después de todo el ME ha sido probado a una precisión impresionante, en toda una serie de medidas que se llaman justamente “medidas de precisión” y se ha encontrado un bosón compatible con el bosón de Higgs del ME. En el ME los neutrinos no tienen masa, el hecho de que se haya encontrado una masa, aunque sea pequeña, ya es una desviación del ME. Además, el mecanismo más natural que se tiene para dar masa a los neutrinos implica la existencia de neutrinos derechos. Pero quizás la evidencia más contundente de que hay física más allá del ME es la existencia de la materia oscura.

A lo que apuntan el problema de la jerarquía y los problemas abiertos del ME es que éste es una teoría efectiva, válida en cierto rango de energías, y que existe una teoría más fundamental que subyace al ME. Un punto a recalcar es que el concepto de naturalidad es un criterio estético y puede no ser la mejor guía para construir teorías o modelos exitosos, como lo prueba el ME. Una mucho mejor estrategia es concentrarse en la consistencia experimental y matemática, así como en la refutabilidad o falsabilidad de la teoría. Que sea falsable no significa que sea falsa, sino que se puede comprobar si es verdadera o falsa mediante la experimentación.

Una teoría fundamental debería explicar el origen y los valores de las masas de las partículas elementales, la naturaleza de la transición de fase electrodébil, el origen de la asimetría entre la materia y anti-materia en el Universo, la naturaleza de la materia oscura, el por qué hay sólo tres generaciones de materia, entre otras. El camino a esta teoría fundamental puede no ser directo, podría ser que vayamos encontrando diferentes teorías efectivas entre la escala electrodébil y la de Planck, como diferentes capas de una cebolla, que vayan dando luz a algunos de los misterios de la física de partículas. Podría ser que realmente no hubiera otra teoría diferente del ME entre la escala electrodébil y la escala de Planck, pero este punto de vista parece estar muy poco motivado por el problema del ajuste fino que se tiene que hacer a la masa del bosón de Higgs a la escala electrodébil. Este nos dice que el rango de validez del ME es alrededor de unos pocos TeVs y se esperaría que aproximadamente a esas energías deberíamos empezar a ver evidencias de la teoría que está más allá del ME, o de la siguiente capa de la cebolla.

## 5. Más Allá del Modelo Estándar

¿Cómo vamos a una teoría más fundamental? Nos encontramos en la frontera de lo desconocido. El camino que ha sido fructífero en el pasado ha sido considerar la adición de simetrías. Las simetrías relacionan distintos parámetros entre sí y fenómenos que parecían distintos se hacen manifiestos como aspectos distintos de un mismo fenómeno. Un ejemplo de esto es la electricidad y el magnetismo, que son dos aspectos de la fuerza electromagnética. El ME fue construido mediante un relación estrecha entre la consistencia matemática y los datos experimentales, a través de simetrías. Es por esto que la adición de simetrías parece un camino natural a seguir para buscar posibles teorías más allá del Modelo Estándar [27–31].

### Más simetría

Una pregunta natural es si la simetría electrodébil y la fuerte podrían estar unificadas, las dos se describen por teorías de norma renormalizables [32–35]. Sabemos cómo se comportan estas teorías conforme cambia la energía gracias al grupo de renormalización, podemos tomar los datos experimentales de los acoplamientos de norma y extrapolarlos a altas energías. Si el valor de las constantes de acoplamiento se vuelven el mismo en

algún punto podremos describir a las interacciones electrodébil y la fuerte como una sola interacción fundamental. Los valores de los acoplamientos de norma son muy diferentes a la escala electrodébil ( $\sim 100$  GeV) y varían con la energía logarítmicamente, de manera que al dejar “correr” las constantes de acoplamiento con el grupo de renormalización éstas coinciden a una escala de energía del orden de  $10^{16}$  GeV, es decir un poco abajo de la escala de Planck. La interacción electrodébil y la fuerte estarían unificadas, es decir sólo habría una interacción fundamental a esa escala de energía (aparte de la gravedad). Entre los grupos de unificación más pequeños, que incluyen a todas las partículas del ME y a sus grupos de norma, son los grupos  $SU(5)$  y  $SO(10)$ .

En las teorías de Gran Unificación (GUT) se supone que la simetría de unificación es exacta a muy altas energías, abajo de cierto umbral (la escala GUT) sufren una transición de fase, de una manera similar a la transición de fase electrodébil, lo cual genera un rompimiento espontáneo de la simetría unificada (similar al rompimiento electrodébil) y lo que queda es el grupo de norma del ME,  $SU(3) \times S(2) \times U(1)$ . Las consecuencias de postular una teoría unificada es que ahora tenemos una relación entre distintos parámetros a través de la simetría. Esto podría explicar la cuantización de la carga eléctrica y su valor, en múltiplos de una carga fundamental de  $1/3$ , así como los valores para algunos cocientes de las masas. Estas teorías predicen además el decaimiento del protón, que hasta ahora no se ha observado. En el caso de los modelos  $SU(5)$  el protón decae mediante unos nuevos bosones exóticos que acoplan a los quarks y leptones permitiéndolos interactuar, llamados leptoquarks. Por otro lado, el grupo  $SO(10)$  unifica también a todas las interacciones, y además incluye a los neutrinos derechos, de manera que puede generar términos de masa para los neutrinos izquierdos observados, mediante el mecanismo del subibaja. Para llegar al grupo de simetría del ME hay que pasar por dos etapas de rompimiento espontáneo de la simetría  $SO(10)$ . Un camino es llevarlo a  $SU(5) \times U(1)$  y de allí al ME, y otro es pasar por un modelo de Pati-Salam  $SU(4) \times SU(2)_L \times SU(2)_R$ . Cada uno de estos rompimientos implica la introducción de un parámetro nuevo, que es la escala de rompimiento asociada al vev de algún campo escalar.

Estos dos son los grupos de unificación más populares, si no se toma en cuenta a la gravedad. Existen también modelos de unificación que no tienen un grupo de norma único, sino un producto de grupos semi-simples (como el de Pati-Salam) o el de trinificación  $SU(3)^3$ . Es posible también concentrarse en el problema de la quiralidad e introducir en el producto de los grupos uno que sea derecho, para así tener una simetría explícita derecha-izquierda. Esto resulta natural en el modelo de Pati-Salam y en el de trinificación. La simetría derecha se encontraría rota a bajas energías, y lo que quedaría sería el modelo estándar.

Las teorías de Gran Unificación han sido estudiadas extensamente desde los años 80 del siglo pasado. Aunque proveen un marco matemático muy elegante para explicar algunas de las interrogantes del ME, es claro que no pueden dar explicación a todas ellas. En los primeros intentos unificadores, se supuso que había un “desierto” entre el ME y las teorías de Gran Unificación.

## Supersimetría

A la par que se desarrollaron estas teorías surgió otra interrogante: ¿Es posible unificar la materia y las interacciones fundamentales? Esto va al meollo de las diferencias entre la descripción de ambas, una se representa con fermiones y la otra con bosones. A la simetría que relaciona a los bosones con los fermiones se le conoce como supersimetría. Es una extensión del grupo de Poincaré (traslaciones y transformaciones de Lorentz) que permite asociar bosones y fermiones mediante una transformación de simetría [36] y en un principio se propuso como una posible unificación de la materia y las interacciones. Sin embargo, al construir una teoría del campo supersimétrica resultó evidente que se necesitaban más partículas que las que hay en el ME para que la teoría fuese matemáticamente consistente. Estas partículas no se observan a la escala de energía electrodébil por lo que se supone que, si existe la supersimetría, debe ser una simetría rota, que se restablece a energías más altas.

Basado en el ME se puede construir la extensión más sencilla supersimétrica del mismo, el Modelo Estándar Supersimétrico Mínimo (MSSM, por sus siglas en inglés) [37, 38]. El ME sería el límite de bajas energías del MSSM, de manera que después del rompimiento de la supersimetría, lo que nos queda es el ME que ya conocemos. La parte Mínimo del nombre del MSSM se refiere a que hay sólo una transformación de supersimetría entre los bosones y los fermiones, y se dice que es una teoría con supersimetría  $N = 1$ . Una teoría supersimétrica puede tener más de una transformación entre bosones y fermiones, puede tener dos, cuatro u ocho. Se dice entonces que la teoría tiene supersimetría  $N = 2, 4$  u  $8$  respectivamente. Las teorías con supersimetría  $N = 8$  contienen al gravitón. En el MSSM a cada bosón del ME le corresponde un fermión supersimétrico y a cada fermión del ME le corresponde un bosón supersimétrico. A las partículas supersimétricas asociadas a las conocidas del ME se les llama supercompañeros. Además, el MSSM tiene dos campos de Higgs que son dobletes electrodébiles, un requerimiento necesario para evitar las anomalías de norma [18, 20, 39]. Uno de los aspectos que hizo inmediatamente popular al MSSM fue que provee una solución al problema de la jerarquía, ya que las correcciones radiativas a la masa del bosón de Higgs se cancelan exactamente por su contraparte supersimétrica. Entonces, el rompimiento de la supersimetría estaría directamente relacionado con la masa del Higgs. Después del rompimiento de la supersimetría y de la simetría electrodébil, quedan cinco bosones de Higgs con masa: dos neutros, uno ligero y uno pesado, dos cargados pesados y un bosón pseudoescalar. El neutro ligero se identifica con el Higgs del ME. En el MSSM no hay que hacer un ajuste fino para estabilizar la teoría, la masa del Higgs resulta del orden de la masa electrodébil. Otro aspecto teórico interesante es que se puede relacionar el rompimiento de la supersimetría con el de la simetría electrodébil.

Un dato que ha recibido mucha atención es el hecho de que la combinación del MSSM y teorías de Gran Unificación (SUSY GUTs) está en mejor acuerdo con los datos experimentales, que las teorías GUT sin supersimetría. Otro punto a su favor es que el MSSM provee naturalmente de candidatos a ser materia oscura, el más popular es el neutralino,



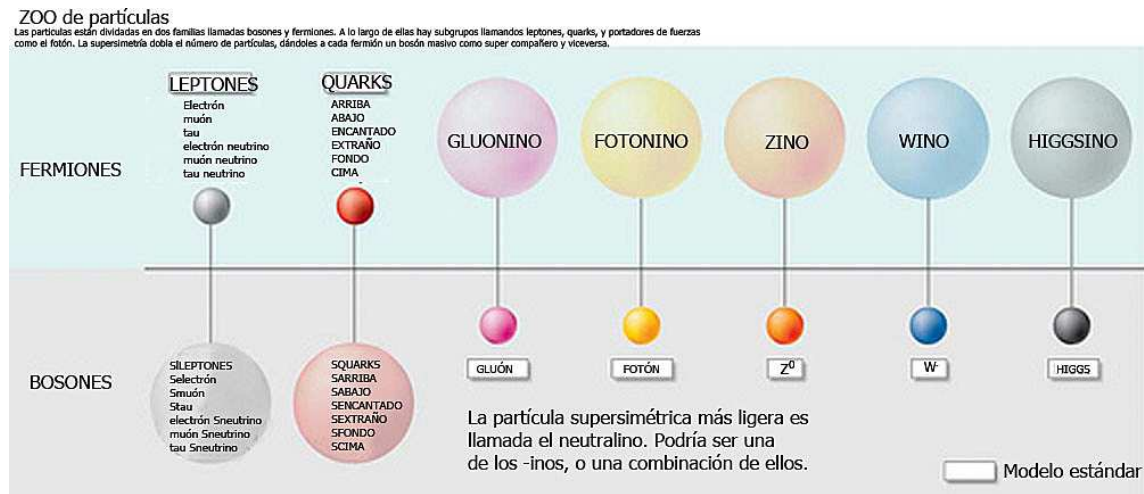


Figura 9: Las partículas del ME y sus compañeros supersimétricos.

que en muchas versiones del MSSM es la partícula supersimétrica más ligera [40]. También puede haber otros candidatos, como el gravitino, el sneutrino, el axino, que son los compañeros supersimétricos del gravitón, el neutrino y el axiÓN respectivamente. Todos estos aspectos interesantes se descubrieron después de que se construyó el MSSM, es decir, no se fabricó la teoría para explicarlos, sino que al estudiarla surgieron como ventajas extras de la simetría entre bosones y fermiones, lo cual sin duda constituye un punto a su favor. Sin embargo, falta el elemento más importante para que una teoría sea realmente exitosa: la confirmación experimental.

No se conoce un mecanismo dinámico del rompimiento de la supersimetría, se tienen ejemplos de mecanismos espontáneos, pero cuyas consecuencias contradicen a los datos experimentales. Por esto se supone que la supersimetría se rompe en el MSSM mediante términos de rompimiento llamados “suaves”, que son términos renormalizables que rompen explícitamente la simetría. Aunque el MSSM tiene aspectos que son teóricamente muy interesantes, la introducción de los términos de rompimiento suaves aumenta considerablemente el número de parámetros libres. Estos se constriñen mediante los datos experimentales y consideraciones teóricas. Primero se descartan todos los que pueden llevar a cambios de sabor (llamados términos de corrientes neutras de cambio del sabor), después se supone que el MSSM es consistente con una hipótesis de unificación, y que a esta escala de GUT muchos de los parámetros deben ser del mismo orden de magnitud, o incluso iguales (“universalidad”). De esta manera se constriñen los parámetros de alrededor de 120 a cinco. A este nuevo modelo se le conoce como el MSSM constreñido o CMSSM. Este es una de las extensiones del ME que se está probando experimentalmente en el LHC, o para ser precisos, regiones del espacio de parámetros de este modelo. Hasta ahora se han descartado las regiones del espacio de parámetros que dan partícu-

las supersimétricas relativamente ligeras. De los resultados experimentales es claro que si el CMSSM se descartase experimentalmente, no podríamos descartar a la supersimetría en sí como extensión del ME, pero sí se impondrían cotas fuertes a otros modelos supersimétricos. Si estos se empiezan a volver demasiado rebuscados, o si las soluciones a problemas abiertos del ME ya no se pueden realizar, estas teorías se irían descartando. De la combinación de ventajas teóricas (que expliquen algunos de los misterios del ME) y los datos experimentales debería deducirse si alguno de los modelos SUSY describe mejor la naturaleza a energías por arriba de los TeVs.

Por supuesto, otra posibilidad es que no exista una simetría entre bosones y fermiones, o que la supersimetría se manifieste a escalas mucho más grandes que  $\sim 1$  TeV y que haya otro mecanismo que estabilice la masa del bosón de Higgs. Una suposición razonable es que los elementos de la teoría más fundamental no sean sólo supersimetría y Gran Unificación, sino que además haya alguna otra simetría o proceso físico desconocido. Después de todo, incluso con la adición estas dos simetrías tan poderosas, todavía quedan cabos sueltos por atar.

### Otras simetrías, partículas e interacciones

Una suposición que parece natural es que los quarks no son fundamentales, sino que están a su vez compuestos de otras partículas. A estas teorías se les conoce como teorías tecnicolor [41, 42]. Estas teorías predicen nuevas interacciones de norma cuya dinámica genera la masa de los bosones  $W^\pm$  y  $Z$ , así como la de los quarks y leptones, sin necesidad de un bosón de Higgs. Sin embargo, estas teorías están fuertemente desfavorecidas por los resultados experimentales de las corrientes neutras que cambian el sabor, así como por las medidas de precisión del ME. El reciente descubrimiento del bosón de Higgs también resta relevancia a estas teorías, aunque en principio lo pueden incorporar.

Entre las adiciones de simetría que no corresponden a simetrías de norma o supersimetría se encuentran las simetrías del sabor [43, 44]. Estas relacionan a los diferentes elementos de nuestra tabla periódica de las partículas a través de una simetría que puede ser continua o discreta. Las representaciones irreducibles de los grupos del sabor se asocian también a las partículas elementales, de manera que estas se transforman tanto bajo el grupo de norma como el grupo de sabor. Esto da relaciones complementarias entre los parámetros, que, en algunos casos, han sido exitosas en describir las razones de las masas de quarks y leptones, es decir en dar soluciones al problema pequeño de la jerarquía de masas. Aunque todavía no se tiene una teoría completa del sabor, los últimos años han visto un adelanto en el uso de los grupos discretos para resolver este problema. En el caso de los grupos continuos, el rompimiento de la simetría implica la aparición de nuevas partículas, llamadas saborones o familiones (flavons o familions), cuya existencia podría indicar la presencia de una simetría continua rota. La no observación de estos estados pone una cota a la masa de los mismos, que depende de las características de cada modelo.



Otra posibilidad muy atractiva es que haya más bosones de Higgs que en el Modelo Estándar [18, 45], con o sin supersimetría. Estos bosones de Higgs extra se introducen generalmente como dobletes de la simetría electrodébil, aunque también se pueden considerar singletes. Una vez que la simetría electrodébil se rompe, las diferentes componentes de los campos de Higgs (cuatro para un doblete electrodébil, que corresponden a dos campos complejos), que están acoplados a los campos vectoriales, dan masa a los bosones vectoriales  $W^\pm$  y  $Z$  y las restantes quedan como estados físicos. Los modelos de dos dobletes de Higgs, sin supersimetría, han sido estudiados también extensivamente como una posible extensión del ME en sí, o como una extensión intermedia entre el ME y el MSSM. Todos los modelos de dos dobletes de Higgs tienen como estados físicos, después del rompimiento de la simetría electrodébil, un bosón neutro, generalmente ligero que se asocia al bosón de Higgs del ME, uno neutro más pesado, dos pesados cargados y un bosón pseudoescalar (es decir no conserva la simetría de carga paridad CP). Las propiedades de estos bosones de Higgs dependen de las características de cada modelo. El descubrimiento de un bosón escalar extra, además del Higgs del ME, indicaría la presencia de nueva física, con posibilidades de que fuera supersimétrica, pero no exclusivamente.

Estos modelos abren la posibilidad de asociar alguno de estos bosones de Higgs extra con materia oscura o con un campo de inflación. Dado que esta clase de modelos ya tienen bosones extra se puede aprovechar esta propiedad para explorar si resuelven además alguno de los problemas del ME, sin necesidad de introducir aún más partículas.

Otro camino a seguir es introducir otra simetría de norma, es decir otra interacción. Por ejemplo, una interacción que tuviera otro bosón tipo electrodébil  $Z'$ . Esto implicaría otra interacción de norma con grupo de simetría  $U(1)'$ . Aunque esto parece ir en la dirección opuesta a la de la unificación de las interacciones de norma, está justificado en los modelos de unificación donde no se tiene un sólo grupo de unificación, sino un producto de grupos semi-simples. Esto puede suceder naturalmente si se tiene un grupo de unificación muy grande, como en las compactificaciones de supercuerdas. En estas teorías el grupo de norma  $E_8$  se rompe a un grupo más pequeño, que típicamente contiene más de un grupo  $U(1)$ .

Podemos, por otro lado, añadir dimensiones espaciales. En 1921 T. Kaluza propuso una unificación de la gravedad y el electromagnetismo en cinco dimensiones espacio-temporales. Unos años después, en 1926, O. Klein propuso que esta dimensión extra es compacta, es decir, esta enrollada en sí misma, como un círculo. La idea consiste en escribir la relatividad general en cinco dimensiones espacio-temporales, al compactificar una nos quedan las ecuaciones de Einstein por un lado y las ecuaciones del electromagnetismo por otro. El hecho de que tengamos una dimensión compacta implica, al momento de cuantizar la teoría, que el momento en esta dimensión está cuantizado. Esto se observaría como una torre infinita de campos escalares con masas proporcionales a  $n/R$ , donde  $n$  es un entero y  $R$  el radio de compactificación de la dimensión extra. La explicación de por qué no veríamos esta dimensión extra es que el radio de compactificación es muy pequeño, el campo escalar (estado de Kaluza-Klein o radión en algunas versiones más

modernas) sería muy pesado. La propuesta de Kaluza y Klein se basa en argumentos geométricos, donde la teoría subyacente es una extensión mínima de la gravedad. La física que observamos dependería sólo de las cuatro dimensiones en las que vivimos.

Una posible unificación de las cuatro interacciones fundamentales la ofrece la teoría de supercuerdas, de la cual hay un artículo de revisión en este libro, y que implica también la existencia de dimensiones extra compactificadas.

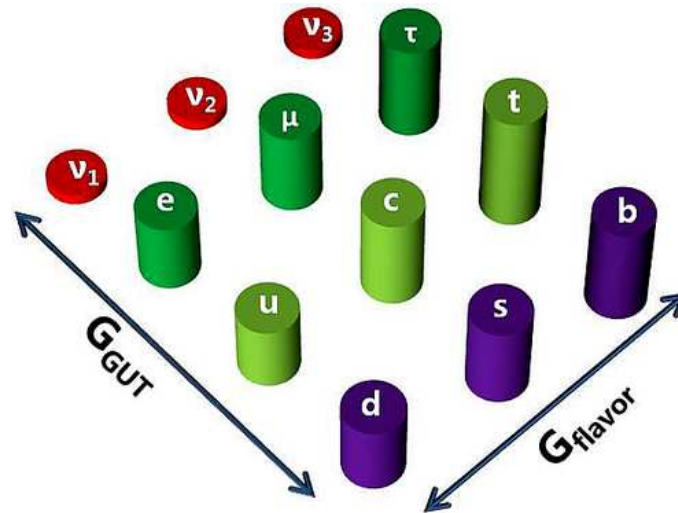


Figura 10: Simetría horizontal del sabor y simetría de Gran Unificación combinadas. Fuente: Grupo de física teórica de partículas elementales, KTH Royal Institute of Technology, Suecia.

En todos los casos el añadir simetrías, entre bosones y fermiones, entre los diferentes sabores, entre las interacciones, etc, tiene consecuencias, predicciones que se pueden probar contra el experimento. Cada uno de estos caminos tiene ventajas y desventajas, y por supuesto, se pueden combinar muchos de estos principios, por ejemplo se puede hacer una teoría supersimétrica GUT con una simetría extra del sabor. Lo que va guiando la imaginación de los teóricos es la belleza de las matemáticas y los resultados experimentales. Es decir, la consistencia de la teoría con el experimento y la consistencia matemática. Teorías que en algún momento pueden parecer muy atractivas pueden ser totalmente descartadas con un dato experimental. Este es el camino que se siguió para construir el ME, que ha sido muy exitoso.

Sin embargo, es necesario hacer una jerarquía de condiciones o constricciones para cualquier teoría que vaya más allá del ME. Primero están la concordancia con los datos experimentales y la consistencia matemática. Después vienen nuestros prejuicios teóricos de cómo debe verse una teoría fundamental. Si el experimento contradice nuestras expectativas, la última palabra es del experimento. La teoría matemática debe describir los fenómenos experimentales de la manera más simple y elegante posible, ¡pero debe

describirlos!

## 6. Fronteras de la física de altas energías

Es claro que los problemas abiertos en la física de Altas Energías conciernen tanto a lo más grande como a lo más pequeño. Para buscar las teorías más allá del Modelo Estándar hay tres fronteras que hay que explorar, tanto desde el punto de vista teórico como experimental: la frontera de la energía, la frontera de la intensidad y la frontera del cosmos.



Figura 11: Fronteras de la física de altas energías. Fuente: Fermilab.

### Frontera de la Energía

En la frontera de la energía se encuentran todos los problemas que tienen que ver con el origen de las masas, la asimetría materia-antimateria o bariogénesis, la materia oscura, la unificación de las interacciones fundamentales y el origen de nuestro Universo, entre otros. Los experimentos en la frontera de la energía se basan en aceleradores poderosos donde se pueden alcanzar energías muy altas, que ocurrieron en la naturaleza al inicio de nuestro Universo. Los aceleradores activos en esta clase de experimentos son el LHC en CERN y hasta hace poco, el Tevatrón en Fermilab. Algunos de los experimentos en

esta frontera son ALICE, que estudia el plasma de quark y gluones, LHCb que estudia la asimetría materia-antimateria, ATLAS y CMS, que estudian varios procesos como la búsqueda y caracterización del Higgs, la existencia de dimensiones extra y la búsqueda de nuevas partículas como las supersimétricas o de materia oscura, Higgses exóticos, bosones vectoriales nuevos, todos ellos en CERN. Estos dos experimentos, aunque estudian procesos físicos similares, lo hacen con diferentes técnicas analíticas y experimentales. Se planean construir más aceleradores en el futuro para continuar la exploración de esta frontera, como el CLIC (Compact Linear Collider) o el ILC (International Linear Collider), que serían colisionadores de electrones-positrones para llegar a energías en el rango multi-TeV.

### **Frontera de la Intensidad**

En la frontera de la intensidad se encuentran los experimentos en donde se utilizan haces muy intensos de partículas que se hacen colisionar para tener una probabilidad de ver eventos extremadamente raros. Los experimentos de esta frontera son típicamente los experimentos de neutrinos, ya que una determinación precisa de su masa y naturaleza es crucial también para entender el origen y evolución del Universo. Están también directamente relacionados con el problema de la violación de CP y, por lo tanto, la bariogénesis. Se encuentran aquí también los experimentos de decaimiento del protón. En el ME el protón es estable, pero muchas teorías de Gran Unificación predicen el decaimiento del protón, si se observa sería otra indicación de física más allá del ME. Esta frontera es estudiada en Fermilab por los experimentos ArgoNeuT, MiniBooNE, MINOS y en el futuro NOVA y LBNE. Estos experimentos están dedicados a estudiar diferentes propiedades de la física de neutrinos. Se encuentran también estudiando esta frontera los experimento T2K en Japón y Daya Bay en China, entre otros.

### **Frontera del Cosmos**

La frontera del cosmos es donde se encuentran los experimentos y observaciones astrofísicas de eventos en donde la naturaleza de las partículas elementales es fundamental para entender estos procesos. Estos son, por ejemplo, la física de las supernovas, las observaciones de las lentes gravitacionales y de la expansión acelerada del Universo, los observatorios de rayos cósmicos y los de rayos gamma. Estas observaciones y experimentos complementan la información que se obtiene de los experimentos en los aceleradores y son cruciales para entender fenómenos como la materia y energía oscura o la bariogénesis, el origen y evolución del Universo, así como para la búsqueda de partículas exóticas. En esta frontera se encuentran los experimentos de rayos cósmicos, como el Pierre Auger (Argentina) o KASCADE (Alemania), los de rayos gamma como HAWC (México), VERITAS (USA), MAGIC (Islas Canarias), HESS (Namibia), así como los experimentos de detección directa de materia oscura, como XENON (Italia) y ZEPLIN (UK) y los dedi-

cados al estudio de la energía oscura como el Dark Energy Survey (Chile) y el BigBOSS (USA), entre otros.

Es claro que, aunque hemos avanzado mucho en nuestro entendimiento de los bloques e interacciones fundamentales de la materia, aún quedan muchas preguntas abiertas por responder. La interacción y el intercambio de información entre estas tres fronteras es lo que nos llevará a la formulación de una teoría más fundamental, donde se puedan explicar algunos de los misterios del ME. Los próximos años serán muy emocionantes para la física de Altas Energías, ya que gracias a la conjunción de los laboratorios terrestres y las observaciones astrofísicas se verá un avance considerable en nuestro entendimiento de la naturaleza de las interacciones fundamentales y su conexión con el origen y evolución del Universo.

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por DGAPA-UNAM por medio del proyecto PAPIIT IN113412.

## 7. Referencias

- [1] C. Llewellyn Smith, "The use of basic science, <http://public.web.cern.ch/public/en/about/basicscience1-en.html>," 2008.
- [2] M. Veltman, *Facts and mysteries in elementary particle physics*. World Scientific Publishing Co., 2003.
- [3] R. Oerter, *The theory of almost everything: The standard model, the unsung triumph of modern physics*. Pearson Education LTD, 2006.
- [4] W. Cottingham and D. Greenwood, *An introduction to the standard model of particle physics*. Cambridge University Press, 2007.
- [5] M. J. Veltman, "Very elementary particle physics," *Lect.Notes Phys.*, vol. 746, pp. 371–392, 2008.
- [6] P. Langacker, "Introduction to the standard model and electroweak physics," *arXiv*, pp. 3–48, 2009, 0901.0241.
- [7] G. Aad *et al.*, "Observation of a new particle in the search for the standard model higgs boson with the atlas detector at the lhc," *Phys.Lett.B*, 2012, 1207.7214.
- [8] S. Chatrchyan *et al.*, "Observation of a new boson at a mass of 125 gev with the cms experiment at the lhc," *Phys.Lett.B*, 2012, 1207.7235.

- [9] T. Cheng and L. Li, *Gauge Theory of Elementary Particle Physics*. Oxford University Press, 1985.
- [10] M. E. Peskin and D. V. Schroeder, *An Introduction to quantum field theory*. Westview Press, 1995.
- [11] A. Zee, *Quantum field theory in a nutshell*. Princeton University Press, 2003.
- [12] I. Aitchison and A. Hey, *Gauge theories in particle physics: A practical introduction. Vol. 1: From relativistic quantum mechanics to QED*. Graduate student series in physics, Institute of Physics, 2003.
- [13] I. Aitchison and A. Hey, *Gauge theories in particle physics: A practical introduction. Vol. 2: Non-Abelian gauge theories: QCD and the electroweak theory*. Graduate student series in physics, Institute of Physics, 2004.
- [14] K. Wilson and J. B. Kogut, "The renormalization group and the epsilon expansion," *Phys.Rept.*, vol. 12, pp. 75–200, 1974.
- [15] W. McComb, *Renormalization methods: A guide for beginners*. Oxford University Press, 2004.
- [16] S. Haywood, *Symmetries and conservation laws in particle physics: An introduction to group theory in particle physics*. Imperial College Press, 2011.
- [17] W. J. Marciano and H. Pagels, "Quantum chromodynamics: A review," *Phys.Rept.*, vol. 36, p. 137, 1978.
- [18] J. F. Gunion, H. E. Haber, G. L. Kane, and S. Dawson, "The higgs hunter's guide," *Front.Phys.*, vol. 80, pp. 1–448, 2000.
- [19] A. Djouadi, "The anatomy of electro-weak symmetry breaking. i: The higgs boson in the standard model," *Phys.Rept.*, vol. 457, pp. 1–216, 2008, hep-ph/0503172.
- [20] M. Gomez-Bock, M. Mondragon, M. Muhlleitner, M. Spira, and P. Zerwas, "Concepts of electroweak symmetry breaking and higgs physics," *arXiv*, pp. 177–238, 2007, 0712.2419.
- [21] J. Erler, "Weighing in on the higgs," *arXiv*, 2012, 1201.0695.
- [22] G. Bertone, D. Hooper, and J. Silk, "Particle dark matter: Evidence, candidates and constraints," *Phys.Rept.*, vol. 405, pp. 279–390, 2005, hep-ph/0404175.
- [23] R. H. Sanders and S. S. McGaugh, "Modified newtonian dynamics as an alternative to dark matter," *Ann.Rev.Astron.Astrophys.*, vol. 40, pp. 263–317, 2002, astro-ph/0204521.

- [24] E. J. Copeland, M. Sami, and S. Tsujikawa, "Dynamics of dark energy," *Int.J.Mod.Phys.*, vol. D15, pp. 1753–1936, 2006, hep-th/0603057.
- [25] S. Weinberg, "The cosmological constant problem," *Rev.Mod.Phys.*, vol. 61, pp. 1–23, 1989.
- [26] P. Peebles and B. Ratra, "The cosmological constant and dark energy," *Rev.Mod.Phys.*, vol. 75, pp. 559–606, 2003, astro-ph/0207347.
- [27] J. R. Ellis, "Beyond the standard model with the lhc," *Nature*, vol. 448, pp. 297–301, 2007.
- [28] P. Langacker, *The standard model and beyond*. Series in High Energy Physics, Cosmology and Gravitation, Taylor and Francis, 2010.
- [29] J. Ellis, "Outstanding questions: Physics beyond the standard model," *Phil.Trans.Roy.Soc.Lond.*, vol. A370, pp. 818–830, 2012.
- [30] J. D. Wells, "Effective field theories and the role of consistency in theory choice," *arXiv*, 2012, 1211.0634.
- [31] A. Pomarol, "Beyond the standard model," *arXiv*, 2012, 1202.1391.
- [32] H. P. Nilles, "Supersymmetry, supergravity and particle physics," *Phys.Rept.*, vol. 110, pp. 1–162, 1984.
- [33] H. P. Nilles, "Minimal supersymmetric standard model and grand unification," *arXiv*, pp. 291–346, 1993. In Boulder 1993, Proceedings, The building blocks of creation.
- [34] S. Raby, "Grand unified theories," *arXiv*, 2006, hep-ph/0608183.
- [35] P. Nath, "Sugra grand unification, lhc and dark matter," *arXiv*, 2012, 1207.5501.
- [36] M. Sohnius, "Introducing supersymmetry," *Phys.Rept.*, vol. 128, pp. 39–204, 1985.
- [37] H. E. Haber and G. L. Kane, "The search for supersymmetry: Probing physics beyond the standard model," *Phys.Rept.*, vol. 117, pp. 75–263, 1985.
- [38] S. P. Martin, "A supersymmetry primer," *arXiv*, 1997, hep-ph/9709356.
- [39] A. Djouadi, "The anatomy of electro-weak symmetry breaking. ii. the higgs bosons in the minimal supersymmetric model," *Phys.Rept.*, vol. 459, pp. 1–241, 2008, hep-ph/0503173.
- [40] G. Jungman, M. Kamionkowski, and K. Griest, "Supersymmetric dark matter," *Phys.Rept.*, vol. 267, pp. 195–373, 1996, hep-ph/9506380.

- [41] K. D. Lane, "An introduction to technicolor," *arXiv*, 1993, hep-ph/9401324.
- [42] F. Sannino, "Technicolor and beyond: Unification in theory space," *J.Phys.Conf.Ser.*, vol. 259, p. 012003, 2010, 1010.3461.
- [43] H. Ishimori, T. Kobayashi, H. Ohki, Y. Shimizu, H. Okada, *et al.*, "Non-abelian discrete symmetries in particle physics," *Prog.Theor.Phys.Suppl.*, vol. 183, pp. 1–163, 2010, 1003.3552.
- [44] A. Mondragon, "Models of flavour with discrete symmetries," *AIP Conf.Proc.*, vol. 857B, pp. 266–282, 2006, hep-ph/0609243.
- [45] G. Branco, P. Ferreira, L. Lavoura, M. Rebelo, M. Sher, *et al.*, "Theory and phenomenology of two-higgs-doublet models," *Phys.Rept.*, vol. 516, pp. 1–102, 2012, 1106.0034.