

¿DE QUÉ ESTÁ HECHO EL UNIVERSO?

De las partículas elementales a la materia oscura

POR

CARLOS MUÑOZ LÓPEZ

*Catedrático de Física Teórica de la Universidad Autónoma de Madrid (UAM)
Vice-director del Instituto de Física Teórica UAM/CSIC*

Conferencia pronunciada el 11 de Marzo de 2009

INTRODUCCIÓN

Sabemos que el mundo está hecho de átomos y que la tabla periódica de los elementos nos describe todos los que existen. Además, dicha tabla puede reducirse esencialmente a tan sólo 3 partículas elementales masivas: dos quarks y el electrón. Si bien es cierto que existen otras partículas elementales necesarias para que se formen los átomos. Éste es el caso de los gluones, que no tienen masa y mantienen unidos a los quarks formando los protones y los neutrones, los cuales a su vez forman el núcleo atómico. Y de los fotones, que tampoco tienen masa y mantienen unidos a los electrones con los protones del núcleo, formando finalmente los átomos. También sabemos que existen otros tipos de quarks y de electrones mucho más pesados que los que forman los átomos, y que existen los neutrinos que sin embargo tienen una masa extremadamente pequeña. Por último, existen otras partículas mediadoras como los gluones o los fotones, las llamadas W y Z, que son masivas a diferencia las anteriores y que intervienen en ciertos procesos de desintegración. Procesos que por ejemplo son fundamentales en la generación de las reacciones de fusión nuclear que se producen en el Sol y sin las cuales no habría vida en la Tierra.

Sin embargo, por simples argumentos gravitacionales, sabemos desde hace más de 70 años que existe más materia en el Universo de la que vemos. De hecho, el 85% de toda la materia existente es oscura. También sabemos que la materia oscura no puede estar formada por materia ordinaria constituida de quarks y electrones, ni tampoco puede estar hecha de neutrinos. ¿Qué forma entonces la materia oscura? Está claro que para explicarla necesitamos que existan nuevas partículas elementales y, de hecho, se están llevando a cabo en todo el mundo numerosos experimentos para detectarlas. Hay experimentos subterráneos, que tratan de detectar la materia oscura que hay alrededor de la Tierra a través de sus choques con los materiales de los detectores. Hay experimentos bajo el hielo polar o bajo el agua del mar, que tratan de detectar los neutrinos producidos por la aniquilación de la materia oscura que podría haberse acumulado en el Sol. Hay experimentos sobre la superficie Terrestre y en satélites, que tratan de detectar los rayos gamma y la antimateria producida también por la aniquilación de la materia oscura, pero en este caso de la existente en el halo galáctico.

Por último, si fuese correcta la teoría de física de partículas que propone que cada partícula conocida tiene una compañera llamada supersimétrica, la materia oscura podría estar hecha de este nuevo tipo de partículas. Y precisamente, la detección de las partículas supersimétricas es uno de los objetivos primordiales del gigantesco acelerador LHC del CERN.

De todo esto y mucho más hablaremos en esta charla.

LAS PARTICULAS ELEMENTALES Y LAS LEYES DE LA FÍSICA

Hoy en día tenemos la certeza de que sólo acabaremos de entender la composición del Universo, si descubrimos las distintas partículas elementales que lo constituyen y las interacciones (o fuerzas) que las mantienen unidas formando todas las cosas: protones, átomos, moléculas, materia ordinaria como esta hoja de papel, seres vivos como nosotros, estrellas, galaxias-el propio Universo. Para llevar a cabo esta tarea, nada mejor que comenzar haciendo una lista de todas las partículas conocidas y de todas sus interacciones y después preguntarnos: ¿hacen falta más partículas en nuestra lista? Empecemos pues.

• Electrones, Fotones y la Electrodinámica Cuántica

A finales del siglo XIX y comienzos del XX todavía se mantenía una cierta confusión con respecto a las relaciones existentes entre ciertos fenómenos físicos, como por ejemplo el calor, el magnetismo, la electricidad, la luz, los rayos X, los rayos ultravioletas, etc. La Electrodinámica Cuántica (QED en su abreviatura del nombre inglés *Quantum Electrodynamics*), que se terminó de construir allá por el año 1949, es la teoría que acabó resolviendo definitivamente el rompecabezas y dando la explicación definitiva. La QED se basa en la Teoría Cuántica de Campos que es a su vez la síntesis de la Mecánica Cuántica y la Relatividad Especial. Además, asume que todas las partículas elementales son puntuales, es decir que no tienen ninguna estructura interna. De esta forma, la QED consigue explicar la interacción entre la luz y la materia.

Como ejemplo paradigmático, tomemos el caso de dos electrones que se repelen. En realidad, la fuerza de repulsión entre los electrones es debida a un proceso de interacción producido por el intercambio de fotones entre ellos, como se describe gráficamente en la figura 1. Los fotones transfieren la información necesaria para que las partículas con la misma carga eléctrica se repelan (de manera semejante a como dos patinadores sobre hielo se desvían de sus respectivas trayectorias, separándose, al tirar uno de ellos una bola de nieve y recogerla el otro). La QED, una de las interacciones fundamentales de la Naturaleza, es por tanto de origen cuántico y tiene asociada un “cuanto” fundamental que la transmite: el fotón. De esta forma se consiguió cuantizar el electromagnetismo clásico de Maxwell: el campo electromagnético pasa a ser la partícula mensajera que llamamos fotón.

La QED se construyó a lo largo de muchos años con el esfuerzo y la dedicación de numerosos científicos. Tantos (y tan importantes) fueron los que contribuyeron a su creación (Dirac, Heisenberg, Pauli,...) que no hay lugar en esta breve charla para hacerles justicia a todos. Sólo hablaremos con un poco más de detalle de aquellos que le dieron el toque final a la teoría: Feynman,

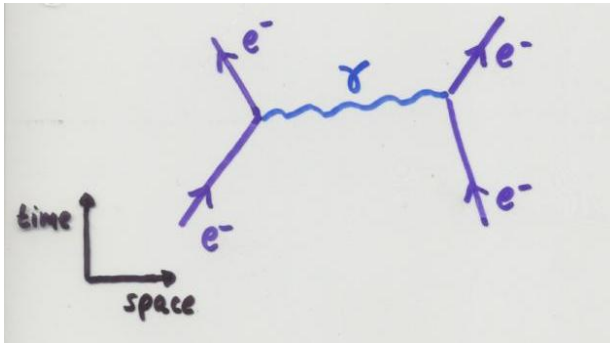


Figura 1: Diagrama que describe la interacción repulsiva entre dos electrones (e^-) vía el intercambio de fotones (γ).

Schwinger y Tomonaga. Dos estadounidenses y un japonés, que de manera independiente y en base al mecanismo conocido ahora como renormalización, consiguieron resolver los problemas matemáticos que presentaba la QED. En concreto, explicaron la forma de eliminar los infinitos que se generan en ciertos cálculos teóricos que envuelven bucles (o *loops* usando la terminología inglesa), como por ejemplo los dos que se muestran en la figura 2 conteniendo un par electrón-positrón (la antipartícula del electrón, igual pero con carga opuesta) o un electrón y un fotón. Feynman introdujo además en su formalismo una interpretación gráfica muy útil, que no sólo permitía visualizar los procesos físicos envueltos, sino también simplificar los cálculos matemáticos. Dicha interpretación, conocida como diagramas de Feynman, la podemos apreciar en la figura 1. Los tres científicos compartieron el premio Nobel en 1965.

La QED ha sido chequeada experimentalmente de manera exhaustiva desde que se formuló y nada mejor que un comentario de 1983 del propio Feynman para describirnos los resultados del análisis: “En este momento puedo decir orgullosamente, que no hay diferencias significativas entre el experimento y la teoría”. Hoy, en 2009, la situación no ha cambiado. La QED es, sin lugar a dudas, la teoría más exacta que se ha construido jamás.

No menos importante es el hecho de que la mayor parte de los fenómenos que observamos en el mundo se puedan explicar usando la QED. Por ejemplo, hoy en día sabemos que cada átomo está formado por un pequeño núcleo central compuesto de dos clases de partículas llamadas *protones* (con carga eléctrica positiva) y *neutrones* (sin carga), con los electrones moviéndose alrededor del núcleo. Pues bien, dicho movimiento es debido al intercambio de fotones entre electrones y protones. En el caso más sencillo del átomo de Hidrógeno, que está formado únicamente por un protón y un electrón, se muestra gráficamente en la figura 2 como este último se mantiene moviéndose a una cierta distancia del protón debido al intercambio de fotones. Por supuesto, que usando la QED también podemos explicar que los átomos se unan para formar las moléculas. Así mismo, podemos entender el comportamiento de los gases, los metales, los aislantes, los cristales, las cosas blandas, las cosas duras, las cosas coloreadas, las cosas transparentes, etc.

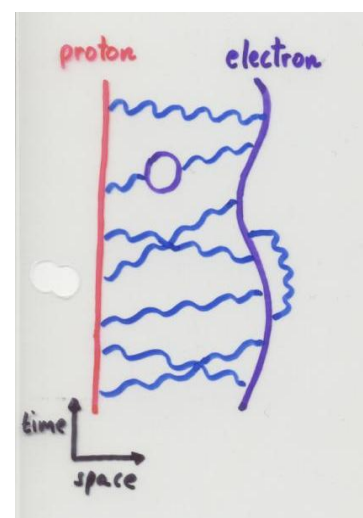


Figura 2: Diagrama que describe la interacción atractiva entre el electrón y el protón que forman un átomo de Hidrógeno.

Sin embargo, no todos los fenómenos se pueden explicar usando la QED. Por ejemplo, ¿por qué los protones se mantienen unidos en los núcleos atómicos, como se muestra gráficamente en la figura 3, a pesar de la repulsión electromagnética entre ellos? Pues bien, para explicar este fenómeno se tuvo que construir una nueva teoría, que ahora pasamos a discutir.

• Quarks, Gluones y la Cromodinámica Cuántica

La Cromodinámica Cuántica (QCD en su abreviatura del nombre inglés *Quantum Chromodynamics*) se terminó de construir allá por el año 1973 y es la teoría que resuelve el problema de la inestabilidad del núcleo atómico. Para ello postula

un nuevo tipo de interacción: la interacción nuclear fuerte, que como su nombre indica es mucho más intensa que la electromagnética (su constante de acoplamiento es mucho mayor).

La QCD establece que los protones y los neutrones no son elementales sino que están formados por unas partículas llamadas quarks. Los quarks *u* y *d* (por *up* y *down* en inglés), a diferencia de las demás partículas, tienen cargas eléctricas fraccionarias, $2/3$ y $-1/3$, respectivamente, de manera que por ejemplo dos *u* y un *d* forman una partícula de carga $+1$, como se representa gráficamente en la figura 4. La interacción nuclear fuerte mantiene unidos a los

quarks por medio del intercambio de otro tipo de partículas elementales llamadas *gluones*, dando lugar al protón. Hay 8 tipos de gluones y éstos son el equivalente al fotón de QED. En lenguaje técnico, a las partículas mensajeras como los gluones y los fotones se les llama bosones debido a que tienen espín entero (de valor 1) y a la materia como los electrones y los quarks se les llama fermiones por tener espín semientero (de valor $1/2$). Mientras que en el caso de la QED todas las partículas con carga eléctrica (y esto incluye también a los quarks) interactúan entre sí a través del intercambio de fotones, en QCD la carga que hace que se transmitan gluones entre los quarks, manteniéndolos unidos, se llama carga de color (nada que ver con el color usual, es simplemente un nombre para diferenciarla de la carga eléctrica).

Véase el diagrama de la figura 5 y su semejanza con el de la figura 1. Todos los hadrones, nombre que se da a las partículas formadas por quarks, se pueden explicar usando la QCD (¡y hay cientos de hadrones además del protón!). El caso del neutrón y del pión de carga negativa están representados en la figura 6, pero podríamos haber dibujado de forma semejante el kaón, la lambda, la sigma, la rho, etc.

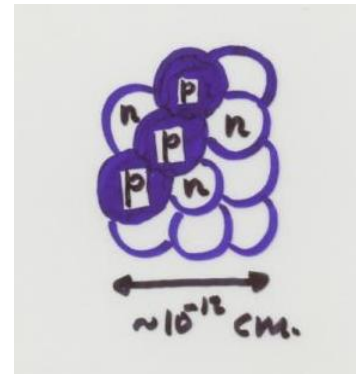


Figura 3: Representación de un núcleo atómico formado por protones (p) y neutrones (n).

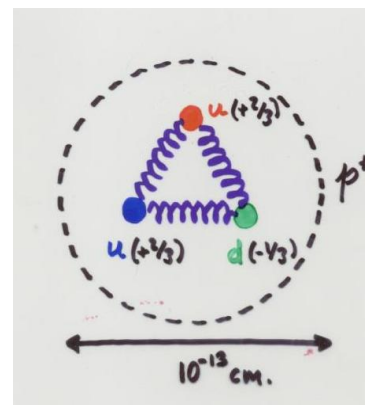


Figura 4: Representación de cómo dos quarks *u* y un quark *d*, unidos a través del intercambio de gluones, forman lo que llamamos protón.

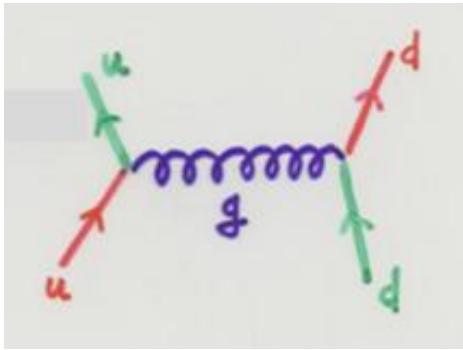


Figura 5: Diagrama que describe la interacción entre un quark u y un quark d , a través del intercambio de gluones (g).

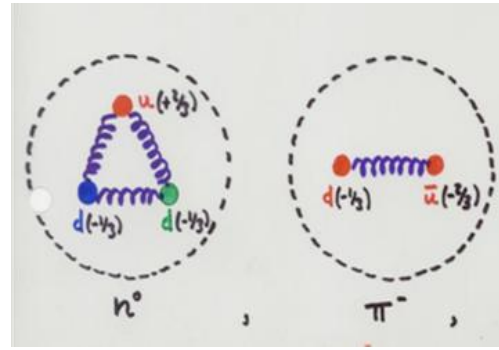


Figura 6: Representación de cómo dos quarks d y un quark u (un quark d y un antiquark u), unidos a través del intercambio de gluones, forman lo que llamamos neutrón (pión cargado).

En cuanto a la interacción entre neutrones y protones formando el núcleo, ésta resulta ser una manifestación complicada de la interacción de color fundamental que ejercen entre si sus constituyentes. Aunque los quarks tienen carga de color, todos los hadrones que forman no la tienen (a semejanza del neutrón que no tiene carga eléctrica a pesar de que los quarks que lo constituyen están cargados), de tal manera que no pueden intercambiarse gluones. Sin embargo, lo que hacen es intercambiarse piones, como se ve en la figura 7. A diferencia de los fotones o los gluones que tienen masa nula, los piones, aun siendo los hadrones más ligeros, tienen aproximadamente $1/7$ de la masa del protón, $1/7 m_p$. El hecho de ser masivos hace que solo puedan existir durante un brevísimo instante de tiempo, como se puede deducir del principio de incertidumbre de Heisenberg. Como consecuencia, la interacción nuclear fuerte es de rango muy corto. De hecho manifiesta sus efectos solo a distancias menores o del orden de 10^{-12} cm, o sea del tamaño del núcleo atómico. En la figura 8 podemos ver como se produce ese intercambio de piones.

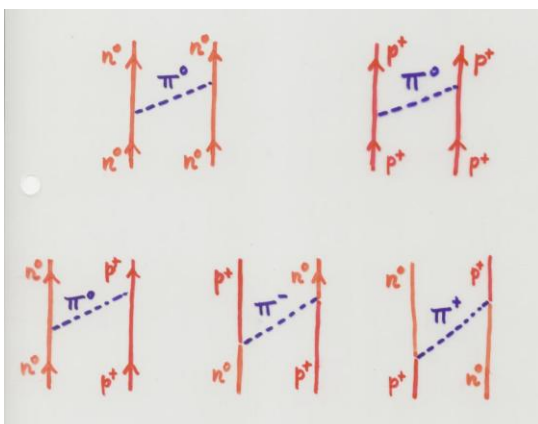


Figura 7: Diagramas que describen las distintas interacciones posibles entre protones y neutrones, debidas al intercambio de piones neutros y cargados.

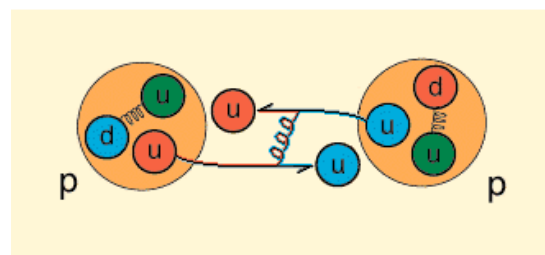


Figura 8: Interacción entre dos protones debida al intercambio de piones.

Al igual que la QED, la QCD se construyó también a lo largo de muchos años. La investigación empezó en los años 50 del pasado siglo, cuando se comenzó a descubrir un número tan grande de hadrones que hizo dudar a los científicos de que pudiesen ser fundamentales. Después de varios intentos de clasificarlos, los estadounidenses Gell-Mann y Zweig propusieron de forma independiente en 1964 que los quarks eran los constituyentes fundamentales de los hadrones y por tanto de la materia. La propuesta fue confirmada en 1968 por los experimentales estadounidenses Friedman, Kendall y Taylor, lanzando electrones sobre protones y neutrones y descubriendo así su estructura interna. Los tres científicos compartieron el premio Nobel en 1990. En 1969 y a raíz del resultado experimental ya lo había obtenido Gell-Mann por sus numerosas contribuciones y descubrimientos que permitieron clasificar las partículas elementales y sus interacciones. En la construcción de la teoría cuántica de los quarks y los gluones participaron muchos otros científicos. El toque final se lo dieron los estadounidenses Gross, Wilczek y Politzer. Los dos primeros y el tercero, de forma independiente, propusieron en 1973 la llamada "libertad asintótica" de los quarks: cuanto más cerca están, más débil es la fuerza que se ejercen entre ellos. De la misma manera, cuanto más lejos están, mayor es la fuerza. Es como si los gluones se comportasen como muelles y de ahí la imposibilidad de ver quarks libres. Por este trabajo los tres científicos compartieron el premio Nobel en 2004.

La mayor parte de los fenómenos nucleares se pueden explicar usando la QCD y la QED. Por ejemplo, la desintegración alfa es debida al corto alcance de la interacción nuclear fuerte, lo que produce que núcleos de un cierto tamaño sean inestables debido a la repulsión electromagnética. Los núcleos recuperan su estabilidad emitiendo núcleos de Helio (partículas alfa), como puede verse en el ejemplo de la figura 9. En esa figura también puede verse un ejemplo de desintegración gamma. Típicamente, después de una desintegración alfa (o beta), el núcleo puede quedar excitado al tener más energía que en su estado fundamental. Mediante radiación electromagnética de alta energía (rayos gamma), el núcleo se desprende de la energía sobrante, en un proceso similar al que sucede en los átomos cuando los electrones saltan de un nivel atómico a otro emitiendo radiación electromagnética (muchas veces luz visible).

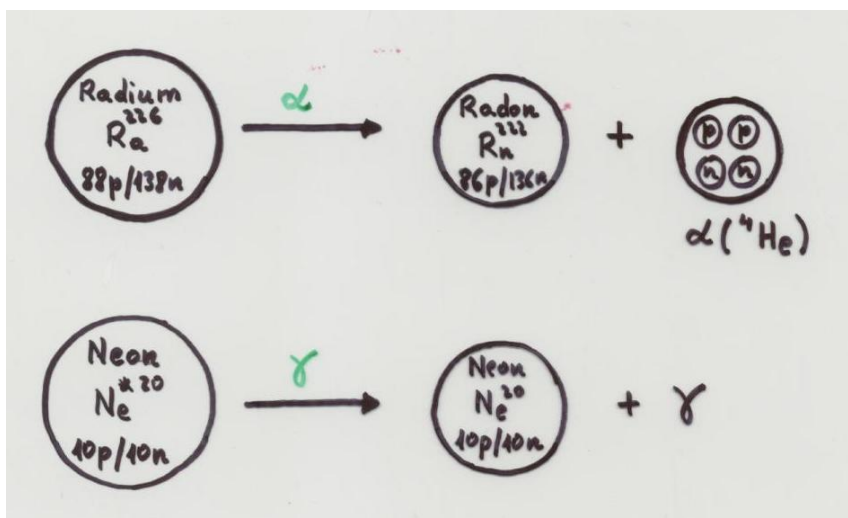


Figura 9: Ejemplos de desintegración radiactiva alfa y gamma.

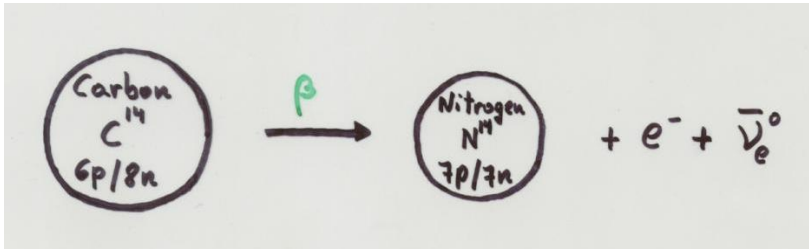


Figura 10: Proceso de desintegración beta del Carbono-14.

Sin embargo, no todos los fenómenos radiactivos se pueden explicar con las teorías anteriores. En la desintegración beta que mencionamos anteriormente y que se caracteriza por la emisión de un electrón, uno se encuentra con la sorpresa de que no se conserva el número de protones y neutrones, como puede verse en la figura 10 para el caso de uno de los isótopos del Carbono. Aunque es cierto que el neutrón es ligerísimamente más pesado que el protón y por tanto el proceso neutrón yendo a protón es en principio posible, ¿qué es lo que lo origina? La respuesta la dio una nueva teoría que pasamos a describir en el siguiente apartado.

• Neutrinos, W, Z y la Teoría (Electro)Débil

Como resultado de postular una nueva interacción se consigue explicar entre otros fenómenos la desintegración beta. La mayor parte de sustancias radiactivas usadas en medicina y tecnología tienen este tipo de radiactividad. La interacción recibe el nombre de nuclear débil por ser mucho menos intensa que la electromagnética. La Teoría Débil se construyó durante los años 60 del pasado siglo. Una de las partículas mensajeras de la interacción tiene carga negativa y recibe el nombre de W^- (y su antipartícula de carga positiva W^+). La W a pesar de ser elemental (no está constituida por otras partículas como los hadrones) resulta tener una masa enorme de aproximadamente $85 m_p$, ¡como la de un átomo de Rubidio! Compárese esta masa con la de otra partícula elemental como el electrón, que es aproximadamente $10^{-4} m_p$. Debido a la masa tan enorme de la W , el rango de la fuerza es extremadamente corto, del orden de 10^{-16} cm.

En la figura 11 podemos entender el proceso que origina la desintegración beta (desintegración que en el caso del Carbono-14 recordemos que es muy útil para la datación de restos antiguos). Uno de los 8 neutrones del Carbono-14 emite una W^- , transformándose uno de sus quarks d de carga $-1/3$ en un quark u de carga $2/3$, conservándose así la carga eléctrica. De esa manera se

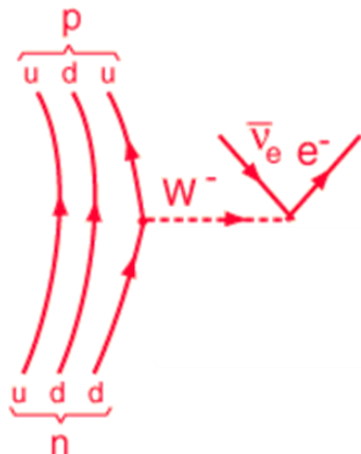


Figura 11: Desintegración del neutrón vía la interacción débil.

obtiene un protón y una W^- , desintegrándose esta última muy rápidamente a un electrón y un antineutrino (la antipartícula del neutrino $\bar{\nu}$ que no tiene carga eléctrica), dando lugar al resultado final que veíamos en la figura 10: el Carbono-14 con 8 neutrones y 6 protones se convierte en Nitrógeno-14 con 7 protones y 7 neutrones y en el proceso se emiten un electrón y un antineutrino. Del diagrama de la figura 11 queda claro que tanto los quarks como los leptones (nombre genérico que se da a las partículas elementales como los electrones y los neutrinos para diferenciarlos de los hadrones que están compuestos de quarks) poseen carga débil. Simplificando la discusión, podemos decir que lo que determina que las partículas posean dicha carga está relacionado con el estado de movimiento de las mismas y no con el tipo de partículas que sean, a diferencia de la interacción nuclear fuerte. Aquellas cuyo espín es antiparalelo a la dirección del movimiento poseen carga débil y pueden interaccionar vía las W . Sin embargo, las que tienen espín paralelo a la dirección del movimiento no poseen carga débil y por tanto no interaccionan.

Como hemos visto, la emisión de neutrinos es un proceso asociado a la desintegración beta y de hecho la historia del neutrino está íntimamente ligada a la misma. Como los neutrinos solo tienen interacción débil, su detección es enormemente complicada. A principios del siglo pasado los procesos de desintegración beta parecían no conservar la energía y fue Pauli quien propuso en 1930 que debería de existir una partícula nueva que acompañase al electrón en el proceso y que llevase consigo la energía que faltaba. Esa partícula es precisamente el neutrino y tardó en descubrirse experimentalmente 25 años. Durante muchos años se pensó que los neutrinos no tenían masa, pero gracias a una serie de experimentos que empezaron analizando los neutrinos solares (la desintegración beta inversa, producir neutrones a partir de protones, es fundamental para generar las reacciones de fusión nuclear que se producen en el Sol), se llegó recientemente a la conclusión de que en realidad tienen masa, aunque esta es extremadamente pequeña, menor de $10^{-11} m_p$.

Los trabajos de los estadounidenses Glashow y Weinberg en 1961 y 1967, respectivamente, así como los del paquistaní Salam en 1968, fueron los que consiguieron establecer la estructura final de la Teoría Débil. De hecho, sus resultados fueron más allá y consiguieron una unificación de la Teoría Débil con la interacción electromagnética (QED), la llamada Teoría Electrodébil. Un resultado de dicha teoría es la existencia de otra partícula mensajera además de la W , la llamada partícula Z^0 , neutra y ligeramente más pesada, y como consecuencia la predicción de la existencia de las corrientes neutras, que pueden verse en el diagrama de la derecha de la figura 12. Ahí se ve como

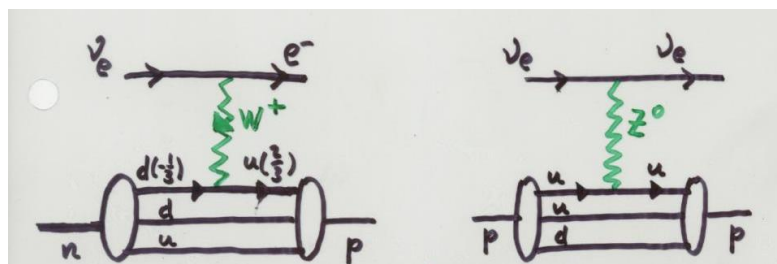


Figura 12: (Izquierda) Interacción de corrientes cargadas. (Derecha) Interacción de corrientes neutras.

lanzando haces de neutrinos sobre núcleos se debería producir la interacción entre ambos debido al intercambio de la Z^0 entre los neutrinos y los protones y neutrones. La primera observación de este proceso se llevó a cabo en el Laboratorio Europeo de Física de Partículas, CERN, en Ginebra en 1973 y posteriormente laboratorios estadounidenses como FERMILAB cerca de Chicago y SLAC en Stanford confirmaron también la Teoría Electrodébil. En el diagrama de la izquierda de la figura 12 podemos ver otro proceso inducido por esta interacción, las llamadas corrientes cargadas, donde al lanzar haces de neutrinos sobre neutrones, debido al intercambio de las W , se obtienen finalmente electrones y protones. Una vez comprobada experimentalmente la Teoría Electrodébil, en 1979 los tres científicos, Glashow, Weinberg y Salam, obtuvieron el premio Nobel.

Sin embargo, hubo que esperar hasta 1983 para detectar de forma directa las partículas W y Z . Los científicos experimentales Rubia y Van der Meer, italiano y holandés, respectivamente, consiguieron crearlas usando colisiones entre protones y antiprotones de enorme energía producidos en el acelerador Super Proton Synchrotron (SPS) del CERN. Por ese logro, ambos recibieron el premio Nobel en 1984.

Posteriormente, en 1999, lo recibieron los holandeses 't Hooft y Veltman por los trabajos realizados en 1971 que demostraban que la Teoría Electrodébil era renormalizable, permitiendo hacer cálculos precisos y compararlos con los resultados experimentales. Algo semejante a lo que se había conseguido 20 años antes con la QED, pero en este caso con lo que en lenguaje técnico se llama una teoría gauge no Abelian (con ruptura espontánea de simetría), como contraposición a la teoría gauge Abelian que es la QED.

Para producir cantidades enormes de partículas W y Z y así poder estudiar en detalle la Teoría Electrodébil, se decidió construir en el CERN un acelerador de electrones y positrones gigantesco de 27 kilómetros de longitud, el llamado *Large Electron Positron collider* (LEP). En la figura 12 podemos ver un dibujo del acelerador. Éste estaba situado a unos cien metros de profundidad y

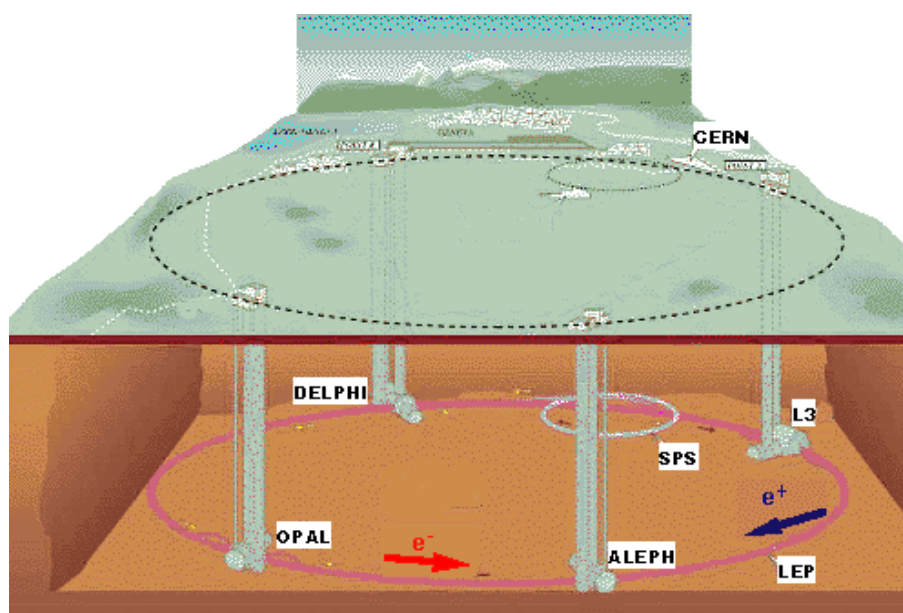


Figura 13: Dibujo del LEP.



Figura 14: Túnel con la maquinaria del LEP

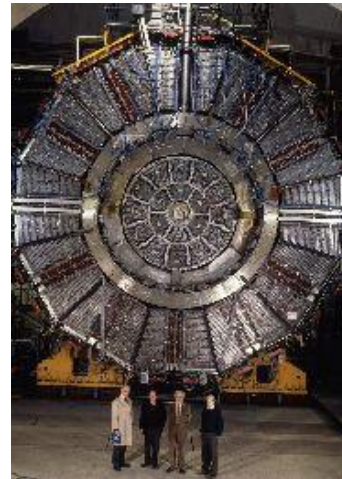


Figura 15: Uno de los cuatro detectores del LEP

disponía de cuatro detectores, DELPHI, OPAL, ALEPH y L3, donde se llevaban a cabo las colisiones, sirviendo el antiguo SPS como un primer acelerador de electrones y positrones que luego se inyectaban en el LEP. En la figura 14 se muestra una foto del interior del túnel del LEP con la máquina donde se aceleran y por donde circulan las partículas en primer plano. En la figura 15 se puede ver una foto de uno de los gigantescos detectores abierto por la mitad. El choque de las partículas se producía justo en su centro, como puede verse en el dibujo artístico de la figura 16. Con el tamaño tan enorme del LEP se conseguía que las partículas se acelerasen hasta velocidades muy próximas a la velocidad de la luz, $c \sim 300.000$ kilómetros por segundo, alcanzando por tanto energías cinéticas enormes. Energías suficientes para crear en los choques de los electrones con los positrones partículas tan sumamente pesadas como las W y Z (como consecuencia de la fórmula de Einstein, $E=mc^2$, que implica que se puede crear materia de la energía). En la figura 17 se puede ver un proceso típico de producción de las W.

Es también importante mencionar que El LEP no solo confirmó con una enorme precisión la Teoría Electrodébil, sino que también sirvió para conocer mejor el Universo primitivo. Fijémonos al respecto en que las energías que se alcanzaron en el LEP eran las que prevalecían cuando el Universo en expansión tenía una edad de tan solo 10^{-10} segundos.

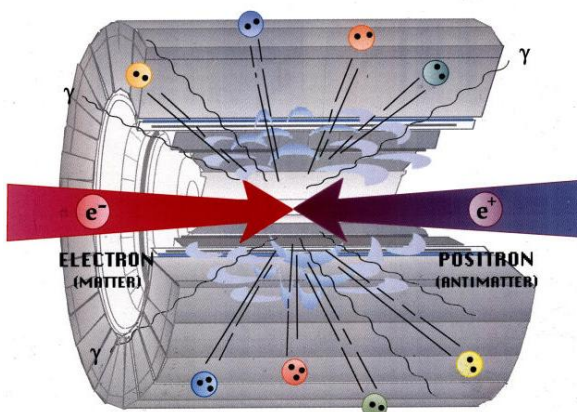


Figura 16: Dibujo artístico de un choque de electrones y positrones en un detector.

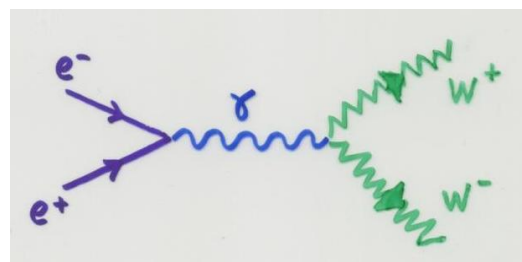


Figura 17: Diagrama de producción de las W en una colisión electrón-positrón.

● El Modelo Estándar de las Interacciones Fundamentales

Parece que hemos llegado por tanto a la conclusión de que todo lo que existe en el Universo está formado por tan sólo un pequeño puñado de objetos elementales. Por un lado tenemos las partículas mensajeras de las interacciones, es decir los *gluones*, el *fotón*, la *W* y la *Z*, y por otro las partículas de materia, donde además del neutrino tenemos a los quarks *u* y *d* y al *electrón*. Partículas estas tres últimas a las cuales se reduce en el fondo la tabla periódica de los elementos que vemos en la figura 18. El viaje científico de un siglo, desde que Mendeleiev propuso su maravillosa tabla en 1869 hasta que la Teoría Electrodébil y la QCD fueron finalmente formuladas, parecía que tocaba a su fin. Demócrito estaba en lo cierto cuando en el siglo V antes de Cristo sostenía que la materia estaba hecha de átomos, pero ahora sabemos más, sabemos que los átomos están hechos de protones, neutrones y electrones, y que los protones y neutrones están hechos a su vez de quarks. Y que todas estas partículas están intercambiándose fotones y gluones entre ellas.

Sin embargo, la historia no acaba aquí. Aunque la materia ordinaria (incluyéndonos a nosotros mismos) está hecha de quarks *u* y *d* y electrones, cuando se producen energías más altas en los experimentos aparecen nuevas partículas elementales. Si a las partículas que forman la materia ordinaria le añadimos el neutrino, llamémosle ν_e , tenemos una familia de partículas elementales. Lo que se comprueba en los experimentos es que en la Naturaleza existen otras dos familias más (véase la figura 19). Las tres familias están formadas por el mismo tipo de partículas, quarks (*u* y *d*, *c* y *s*, por charm y strange en inglés y *t* y *b* por top y bottom en inglés) y leptones (electrón *e*, muón μ , tau τ y sus neutrinos asociados ν_e , ν_μ , ν_τ), pero las de la segunda familia son más pesadas que las de la primera y las de la tercera más pesadas que las de la segunda. Tanto las partículas de la segunda familia como las de la tercera, son altamente inestables y se desintegran rápidamente. En 1972 los

THE PERIODIC TABLE

Legend:
 H — SYMBOL
 1 — ATOMIC NUMBER
 1.008 — ATOMIC WEIGHT
 Hydrogen — NAME

() = ESTIMATES

www.hmpublishing.com
 © Hayden-McNeil Specialty Products

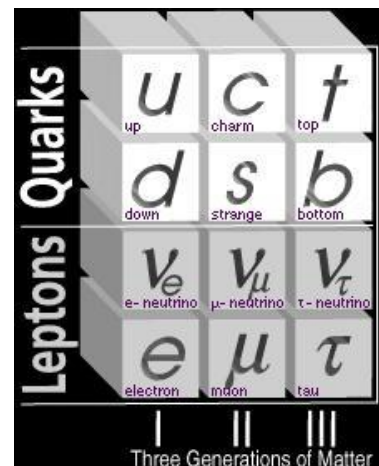


Figura 18: La Tabla Periódica.

Figura 19: Las tres familias de partículas elementales.

japoneses Kobayashi y Maskawa se dieron cuenta de que era necesaria la existencia de tres familias de partículas para que la teoría incorporase interacciones que violan CP y así fuese completamente realista. Por esta predicción, muy anterior al descubrimiento de la tercera familia, recibieron el premio Nobel en 2008.

Pues bien, la QCD junto con la Teoría Electrodébil, en el contexto de tres familias de partículas elementales, constituyen lo que se llama hoy en día el Modelo Estándar de las interacciones fundamentales. Un modelo que funciona perfectamente en la práctica y que ha sido confirmado con gran precisión en numerosos experimentos. Ni que decir tiene que el LEP fue uno de ellos. Además, el Modelo Estándar proporciona los fundamentos de la cosmología del Universo primitivo desde que tenía una edad de 10^{-10} segundos en adelante, como podemos ver en el esquema de la figura 20.

Aunque el Modelo Estándar es muy satisfactorio, también hay que reconocer que deja varias cuestiones abiertas de notable importancia. Por ejemplo, nadie sabe por qué razón las partículas tienen masas tan distintas. Recordemos que mientras que los neutrinos tienen masas más pequeñas de $10^{-11} m_p$, el electrón es siete órdenes de magnitud más pesado, $\sim 10^{-4} m_p$, o el quark top pesa $\sim 185 m_p$. Éste es uno de los grandes misterios que quedan por resolver. Misterio que tiene que estar necesariamente relacionado con el origen de las masas. ¿Cuál es el mecanismo que genera las masas de las partículas elementales?, ¿por qué casi todas las partículas tienen masa, en lugar de no tenerla como el fotón o los gluones? Para intentar responder a estas cuestiones es útil entender la estructura matemática del Modelo Estándar.

En lenguaje técnico (usando teoría de grupos) decimos que el Modelo Estándar tiene invariancia gauge $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$. Dicha invariancia indica que las funciones de ondas de las partículas pueden transformar de cierta manera (transformaciones de gauge), pero la teoría matemática completa (determinada por su Lagrangiano) no cambia. El grupo gauge no Abelian $SU(3)$ corresponde a la QCD e indica que los quarks aparecen en el Lagrangiano en representaciones que son tripletes de color (cada quark puede

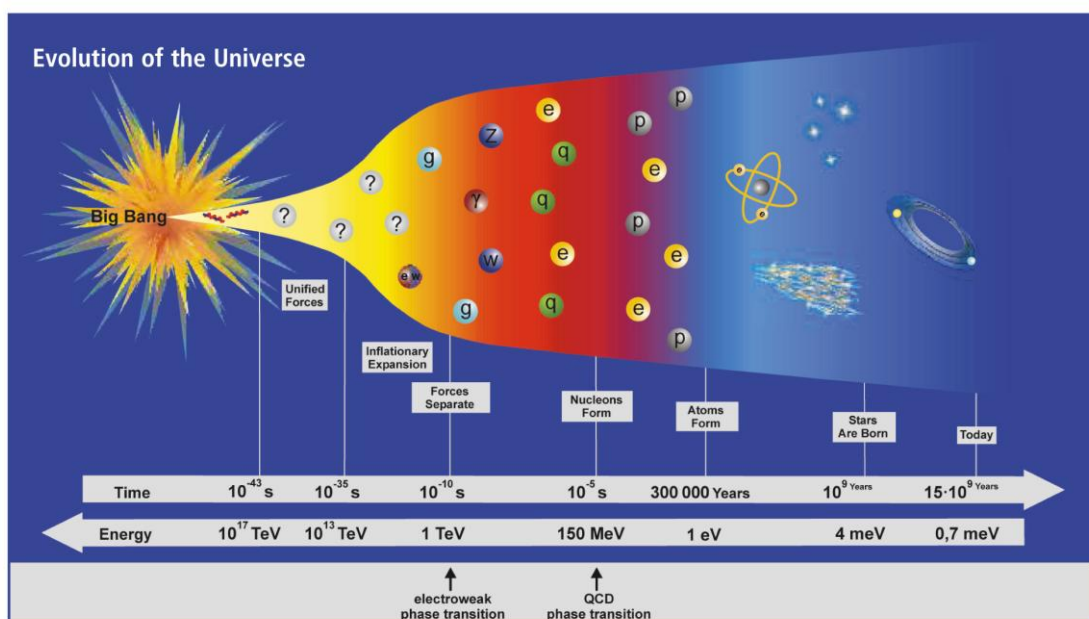


Figura 20: Evolución del Universo.

tener tres “colores”). Los gluones cambian el color de los quarks al interactuar con ellos. El grupo gauge no Abelian SU(2) corresponde a la Teoría Débil e indica que las partículas con espín antiparalelo aparecen para cada familia en el Lagrangiano en representaciones dobles, como por ejemplo (u, d) y (ν_e , e). Las W al interactuar con un miembro del doblete lo transforman en el otro. Por último, el grupo gauge Abelian U(1) está relacionado con la QED, aunque no es exactamente la misma teoría. Indica que cada partícula lleva asociada una carga llamada hipercarga y que la partícula mensajera interactúa con toda partícula con hipercarga pero sin transformarla. La combinación SU(2)xU(1) corresponde a lo que llamamos simetría electrodébil. Dado que a las energías actuales sólo se manifiesta el electromagnetismo (e.m.), en lenguaje de grupos U(1)_{e.m.}, dicha simetría debe estar rota. La ruptura se produce a través de un mecanismo conocido como ruptura espontánea de simetría. Éste fue estudiado en los años sesenta del pasado siglo por el japonés Nambu, quien recibió en 2008 el premio Nobel por esos trabajos pioneros, compartiéndolo con Kobayashi y Maskawa, cuyo descubrimiento también estaba relacionado con la ruptura de simetría.

La ruptura de la simetría puede originar las masas de las partículas elementales a través del llamado mecanismo de Higgs (por el apellido de uno de los científicos que lo propuso en 1964). Usando el lenguaje de la Teoría Cuántica de Campos, en dicho mecanismo se postula que existe un nuevo campo, el *Higgs*, y que las distintas interacciones de este campo con todos los demás asociados a las partículas del Modelo Estándar, generan sus masas. Una consecuencia crucial del mecanismo es que debería existir una partícula asociada al campo de *Higgs*. La detección de la partícula de *Higgs* daría por concluida la construcción del Modelo Estándar.

Uno de los objetivos principales del acelerador de partículas elementales más potente del mundo, el llamado *Large Hadron Collider* (LHC), que empezará a funcionar a finales de este año 2009 en el CERN, es precisamente la detección del *Higgs*. Para la construcción del LHC, que ha tenido un coste aproximado de cuatro mil millones de euros, se ha aprovechado el túnel del LEP pero ha habido que cambiar la maquinaria que acelera a las partículas, al ser éstas ahora protones en lugar de electrones y positrones (compárense las figuras 14 y 21). Así mismo, ha habido que cambiar los detectores. En lugar de los cuatro que tenía el LEP, el LHC tiene dos dedicados a la física de partículas elementales, ATLAS y CMS. Ambos son incluso más gigantescos que los del LHC (compárense las figuras 15 y 22). El detector CMS tiene un peso total



Figura 21: Túnel con la maquinaria del LHC



Figura 22: Detector CMS del LHC



Figura 23: Higgs (el científico) visitando uno de los detectores del LHC donde se pretende detectar el Higgs (la partícula).

de 12.500 toneladas, un diámetro de 15 metros y una longitud de 21,5 metros. En su construcción estuvieron trabajando más de 2.000 científicos e ingenieros de 36 países y 160 instituciones. El detector ATLAS es todavía más grande que el CMS, ya que tiene nada menos que 46 metros de largo y 25 metros de alto. En la figura 23 podemos ver a Higgs visitando el detector ATLAS durante su fase de construcción.

● **Especulaciones: ¿Existen otras partículas sin detectar?**

El Modelo Estándar quedó bien establecido en los años setenta del pasado siglo, pero ya por esos años había físicos teóricos que trataban de ir “Más Allá del Modelo Estándar”. Fueron los rusos Golfand y Likhtman en 1971, Volkov y Akulov en 1972, así como el alemán Wess y el italiano Zumino conjuntamente en 1974, los que propusieron un nuevo tipo de simetría llamada Supersimetría. Como se puede deducir de toda la discusión anterior, las simetrías son cruciales en física: Las leyes de la física son invariantes bajo ciertas simetrías. En concreto, bajo las transformaciones de Lorentz (relatividad especial) y bajo las transformaciones de gauge ($SU(3) \times SU(2) \times U(1)$). Mientras que las primeras son simetrías del espacio-tiempo, las segundas corresponden a simetrías internas (se transforma la función de ondas).

Pues bien, a los científicos mencionados se les ocurrió que tal vez la Naturaleza era también invariante bajo otro tipo de simetría interna: el intercambio de fermiones y bosones. Es decir, que si escribimos el Lagrangiano inicial de nuestra teoría conteniendo bosones y fermiones y transformamos los bosones a fermiones y los fermiones a bosones, el Lagrangiano no debería cambiar. El problema se presenta cuando nos damos cuenta de que el número de grados de libertad bosónicos y fermiónicos del Modelo Estándar no coincide. No hay más que contar por un lado los quarks y leptones que tenemos y por otro los gluones, la W y la Z y el fotón. Es imposible hacer ajustes para que transformen unas partículas en otras en el Lagrangiano. Para solventar este problema, el francés Fayet propuso en 1976 que cada partícula conocida tuviese una (super) compañera, y como consecuencia, ¡que se doblase el número de partículas existentes en la Naturaleza! Y así tenemos ya lo que constituye el armazón de la Teoría Supersimétrica. Por supuesto, a su construcción contribuyeron muchos científicos y desde que se propuso hasta la actualidad ha sido objeto de numerosos análisis teóricos.

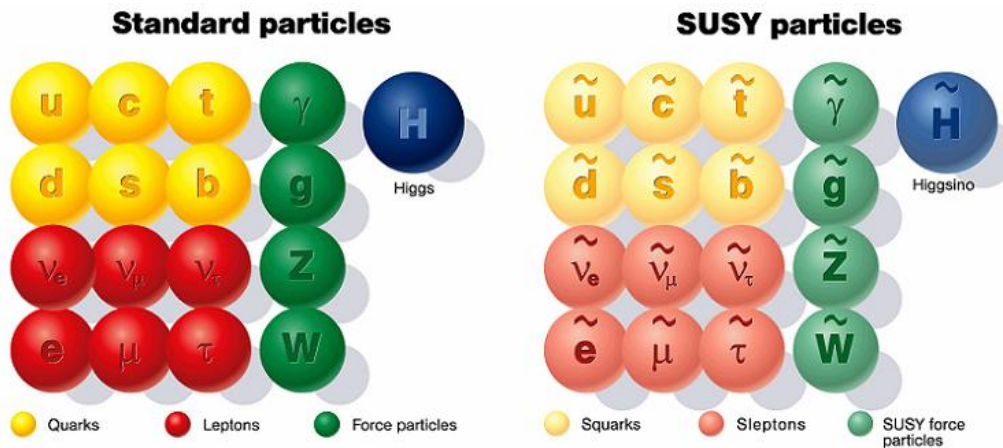


Figura 24: Clasificación de las partículas del Modelo Estándar y sus hipotéticas compañeras supersimétricas (SUSY).

Como podemos ver en la figura 24, en la Teoría Supersimétrica los quarks y leptones (espín $\frac{1}{2}$) tienen como compañeros supersimétricos a los squarks y sleptones (espín 0), respectivamente, y los gluones, el fotón y las W y Z (espín 1) tienen como compañeros supersimétricos a los gluinos, el fotino y los Wino y Zino (espín $\frac{1}{2}$), respectivamente. De esta manera se consigue que un Lagrangiano conteniendo a todas estas partículas quede invariante cuando se transforman unas en otras.

Aunque la Supersimetría se propuso por razones puramente “estéticas”: ampliar las posibles simetrías de la Naturaleza, posteriormente se descubrió que también servía para resolver un importante problema teórico del Modelo Estándar, el llamado problema de las jerarquías. Este problema está relacionado con la existencia del Higgs. Al ser ésta una partícula scalar (espín 0), diagramas con *loops*, semejantes a los que discutimos en el caso de la QED, generan una masa del Higgs excesivamente grande como para poder obtener una ruptura correcta de la simetría electrodébil. Posteriormente, veremos también como la Supersimetría puede resolver el problema de la materia oscura.

Ahora bien, la pregunta clave es: ¿pueden especulaciones puramente teóricas como la Supersimetría ser comprobadas experimentalmente? Afortunadamente la respuesta es que sí. La misma solución del problema de las jerarquías por la Supersimetría implica que las masas de las partículas supersimétricas deberían estar alrededor de la escala electrodébil, es decir no deberían ser más pesadas de $1000 m_p$. Y precisamente estas energías son las que se van a alcanzar en el acelerador LHC del CERN del que hablamos anteriormente cuando discutíamos la detección del Higgs. De nuevo, por tanto, se confirma que el experimento LHC es crucial para desentrañar los misterios de la Naturaleza. Sin embargo, la detección del Higgs, de las partículas supersimétricas o de cualquier otra partícula que pueda estar esperándonos no es una tarea sencilla. Para darnos una idea del ingente trabajo que les espera a los experimentales, mencionemos que cada haz que circula por el acelerador contiene trescientos billones de protones y que cuando un haz incide sobre otro se producen sesenta mil choques, como el que se simula en la figura 25. En principio, el análisis de los mismos puede parecer una tarea trivial para los

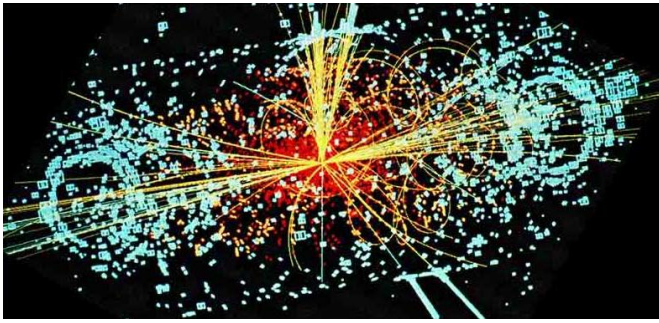


Figura 25: Simulación de un choque de protones en el LHC.

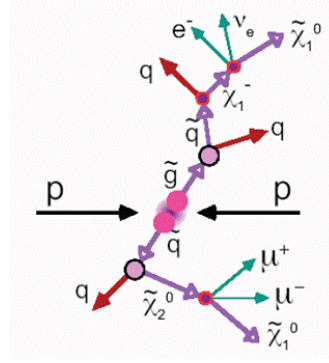


Figura 26: Diagrama de producción de partículas supersimétricas en un choque de protones.

potentes ordenadores que escudriñarán los datos del LHC. Sin embargo, como los protones dan diez mil vueltas alrededor del LHC cada segundo, en total se producirán seiscientos millones de choques por segundo. ¡Y todos ellos tienen que analizarse!, porque puede que en alguno de esos choques se produzcan por ejemplo partículas supersimétricas como las que se ven en el diagrama de la figura 26.

LA MATERIA OSCURA

Uno de los grandes enigmas científicos que todavía queda por resolver es el problema de la materia oscura en el Universo. El 85% de la masa del Universo es debida a algún tipo de materia que no emite luz, la llamada materia oscura. Aunque la existencia de dicha materia fue sugerida hace ya más de setenta años por el astrónomo suizo Zwicky, todavía no se sabe de qué está hecha. Si que se sabe sin embargo que está ahí porque es la única manera de explicar las curvas de rotación anómalas de las galaxias. Resumiendo, la velocidad de rotación que se mide de estrellas aisladas o nubes de gas en las partes externas de las galaxias no es la que uno esperaría de la atracción gravitacional debido a la materia luminosa. Esto es lo que lleva a los astrónomos a asumir que debe haber materia oscura dentro y alrededor de las galaxias. Aunque todavía se desconoce su naturaleza, su hipotética existencia no debería ser tan sorprendente si recordamos que algo semejante ocurrió con el descubrimiento de Neptuno. En 1846 Galle lo descubrió debido a la sugerencia de Le Verrier sobre la base del movimiento irregular de Urano.

• ¿Por qué necesitamos la materia oscura?

Calcular la velocidad de rotación de estrellas o nubes de Hidrógeno que están situadas muy lejos de los centros de galaxias es sencillo, sólo hace falta usar la ley de Newton. Si el objeto se encuentra a una distancia r del centro de una galaxia de masa M , igualando la fuerza centrífuga a la fuerza gravitatoria obtenemos: $v^2/r = GM/r^2$. Es decir, que la velocidad debería decrecer con la distancia como $v = (GM/r)^{1/2}$, lo cual es proporcional a $1/r^{1/2}$. Sin embargo, lo que los astrónomos observan es que la velocidad aumenta hasta adquirir un valor constante del orden de cientos de kilómetros por segundo. La única solución

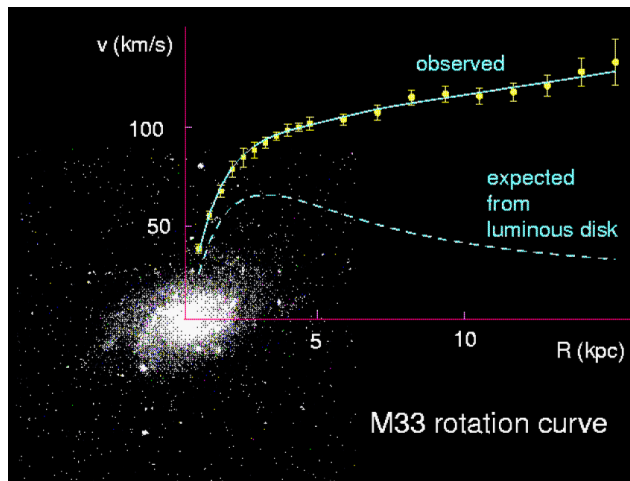


Figura 26: Curva de rotación observada de la cercana galaxia espiral enana M33, superpuesta sobre su imagen óptica.

plausible es que la masa de la galaxia no sea sólo debida a la materia luminosa que vemos alrededor del centro galáctico, sino que crezca de forma proporcional a la distancia, incluso en zonas muy alejadas del centro. Por supuesto, Si M es proporcional a r , de la fórmula anterior se obtiene que v es constante. Un ejemplo de esta situación puede verse en la figura 26, donde se muestra la curva de rotación de M33, una de las aproximadamente 45 galaxias que forman nuestro pequeño cúmulo de galaxias conocido como Grupo Local. Para hacer la comparación, se muestra también la velocidad esperada si sólo hubiese materia luminosa, donde se ve como decrece con la distancia.

De estas observaciones y otras en cúmulos de galaxias y estructuras a escalas incluso más grandes, así como de las observaciones cosmológicas llevadas a cabo por satélites como WMAP, se deduce que el 85% de toda la materia que existe en el Universo es materia oscura. Ésta no sólo se acumula con la materia estelar formando los halos galácticos, sino que también existe como una densidad de fondo en el Universo entero. Así que el problema ya no consiste en explicar el por qué de las curvas de rotación sino en descifrar la naturaleza de la materia oscura. Aunque todavía hay un pequeño grupo de científicos que tratan de explicar las curvas de rotación en galaxias introduciendo modificaciones en la ley de Newton a grandes distancias, evitando así la necesidad de materia oscura, todos los resultados observacionales tienden a confirmar su existencia. Este es el caso de las curvas de rotación en estructuras más grandes que galaxias, que mencionamos anteriormente, de los resultados del *Sloan Digital Sky Survey* que confirman que la densidad del halo disminuye como $1/r^3$, como se predice en los modelos de materia oscura, de las observaciones del *bullet cluster*, etc.

• **¿De qué está hecha la materia oscura?**

Los intentos de encontrar una contestación a esta pregunta han dado lugar a relaciones muy interesantes entre la física de partículas, la astrofísica y la cosmología, generando un nuevo campo interdisciplinar que hoy en día llamamos física de astropartículas. La razón es que las partículas elementales son las únicas candidatas que pueden estar presentes en la cantidad adecuada para explicar la densidad observada de materia en el Universo. Además, son necesarias para explicar la formación de estructuras. Primero se produjeron

acumulaciones de partículas neutras (materia oscura) a través de la atracción gravitacional y posteriormente, cuando los átomos neutros se formaron, éstos fueron atraídos gravitacionalmente por la materia oscura formando las galaxias.

Dado que la materia ordinaria está hecha de protones y neutrones, la posibilidad más sencilla sería asumir que ésta es también la composición de la evasiva materia oscura. El gas observado no es suficiente, así que objetos astrofísicos conocidos como MACHOs (iniciales del nombre inglés MAAssive Compact Halo Objects) serían necesarios como posibles candidatos. Este es el caso de las enanas blancas y marrones, los planetas similares a Júpiter, las estrellas de neutrones, etc. Sin embargo, el escenario de la llamada nucleosíntesis en el contexto de la gran explosión (o *Big Bang* en inglés), que explica el origen de los elementos después del *Big Bang* teniendo en cuenta las abundancias medidas de Helio, Deuterio y Litio, pone un límite al número de protones y neutrones que pueden existir en el Universo. Este número es claramente insuficiente para proporcionar toda la materia oscura que se necesita. Por tanto, la conclusión a la que se llega es que objetos formados de protones y neutrones contribuyen a la materia oscura, pero que no son suficientes y hacen falta más candidatos. De hecho, estos resultados se ven confirmados también por las observaciones de MACHOs en nuestro halo galáctico. Su contribución a la materia oscura es pequeña, así que es necesaria otro tipo de materia en el Universo.

En el contexto del Modelo Estándar de la física de partículas, los únicos candidatos que quedan son los neutrinos. Aunque es cierto que estas partículas llenan el Universo en cantidades enormes, alrededor de cien neutrinos por centímetro cúbico, como vimos anteriormente su masa es muy pequeña, menor de $10^{-11} m_p$, demasiado pequeña para poder reproducir la cantidad de materia oscura que necesitamos. Además, los neutrinos no pueden reproducir correctamente las estructuras observadas en el Universo, por pertenecer a la categoría llamada materia oscura “caliente”. Este tipo de materia oscura tenía una velocidad muy grande, cercana a la velocidad de la luz, cuando las galaxias se comenzaban a formar. En un Universo dominado por la materia oscura caliente a las galaxias les habría costado más formarse y sólo habrían aparecido muy recientemente, en contra de lo que sabemos.

Por tanto, la situación es que los únicos candidatos a materia oscura que se sabe que existen y que no está formado de protones ni neutrones, los neutrinos, quedan excluidos. Claramente, esto es una indicación de que necesitamos ir más allá del Modelo Estándar de la física de partículas. Necesitamos una nueva partícula que sea estable o con una vida media mayor que la edad del Universo, dado que tuvo que ser creada después del Big Bang y tiene que estar presente todavía hoy, y que además reproduzca la cantidad observada de materia oscura. En cuanto a esta última característica, se sabe que una partícula que tenga interacciones de tipo débil y una masa de cien a mil veces la masa del protón serviría. Si tenemos en cuenta nuestra discusión anterior, cuando especulábamos más allá del Modelo Estándar, quizá recordemos que ciertas partículas supersimétricas cumplen estos requisitos. En el lado derecho de la figura 24 podemos ver al Zino, que es una partícula neutra, con interacciones débiles, con la masa adecuada y que puede hacerse estable cuando se construyen modelos supersimétricos. ¿Por qué no usar entonces el Zino como candidato a materia oscura? No deja de ser una coincidencia sorprendente que la Supersimetría, cuya motivación original no



Figura 27: Fotografía de la galaxia M47 que tiene un tamaño como el de la Vía Láctea y es también una galaxia espiral.

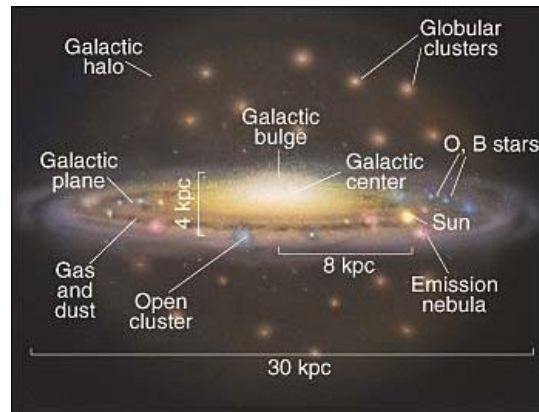


Figura 28: Dibujo de la Vía Láctea donde puede verse el halo de materia oscura rodeándola y el Sol situado a unos 8 kpc del centro galáctico.

tiene nada ver que con la materia oscura, nos proporcione sin embargo un candidato natural. Para ser más exactos y sin entrar en detalles técnicos, el candidato se llama neutralino y viene a ser una combinación del Zino, el fotino y los Higgsinos.

El neutralino no es el único candidato supersimétrico que ha sido propuesto para constituir la materia oscura del Universo. Otros candidatos posibles serían el sneutrino, el axino y el gravitino. Estos dos últimos podrían incluso no ser estables en ciertos modelos supersimétricos, aunque con una vida media mayor que la del Universo. Hay otras teorías que van más allá del Modelo Estándar y donde también surgen otros tipos de candidatos, como los axiones, las partículas de Kaluza-Klein, etc. Pero es adecuado decir que de todos ellos el neutralino es todavía el que reúne las características más interesantes y el que ha sido más analizado en la literatura científica. La cuestión que debería preocuparnos ahora es: ¿podemos detectar el neutralino en experimentos de materia oscura? Tengamos en cuenta que su detección en el acelerador LHC sería sin duda un gran éxito científico y también un indicio de que podría constituir dicha materia, sin embargo, la confirmación completa de que es realmente la materia oscura solo puede venir de experimentos donde se detecte el neutralino formando parte del halo galáctico.

● La detección de la materia oscura

Como se discutió anteriormente, si los neutralinos componen la mayor parte de la materia oscura, entonces existirán no sólo como una densidad de fondo en todo el Universo, sino que también se acumularán gravitacionalmente al igual que las estrellas en los halos galácticos. Por supuesto, estarán presentes en nuestra propia galaxia, la Vía Láctea, y esto nos da esperanzas de que podamos detectar neutralinos directamente por medio de experimentos realizados en la Tierra. De hecho, estudios generales sobre la posibilidad de detectar la materia oscura empezaron ya en 1982. Dado que la detección sería en la Tierra, hace falta conocer las propiedades de nuestra galaxia para estar seguros de que dicha detección es factible.

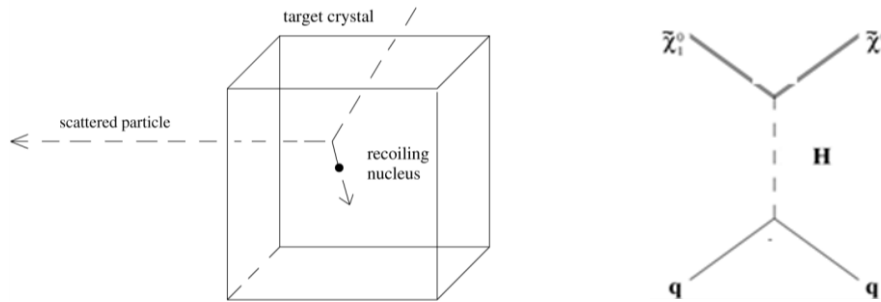


Figura 29: (Izquierda) Una partícula de materia oscura choca contra un núcleo de un cristal en un detector produciendo que éste retroceda. La partícula sigue desplazándose después del choque. (Derecha) Interacción entre el neutralino (línea doble) y un quark (línea sólida) debido al intercambio de Higgses (línea entrecortada).

La Vía Láctea es una galaxia espiral que se asemeja mucho a la M47 que podemos ver en la figura 27. En el dibujo de la figura 28 podemos ver el halo galáctico, que tendría una distribución de tipo esférico y estaría lleno de materia oscura, y también como el Sol está situado a unos 8 kiloparsec (kpc) del centro galáctico, donde un kpc corresponde a más de 3000 años-luz de distancia. Del análisis de las curvas de rotación, se puede deducir que alrededor del Sol debe haber una densidad media de materia oscura atrapada en el pozo de potencial gravitacional de la galaxia de 5×10^{-24} gramos por centímetro cúbico (que viene a ser aproximadamente como si hubiese un protón por cada centímetro cúbico). Asumiendo por ejemplo que los neutralinos son cien veces más pesados que el protón, se deduce una densidad de neutralinos de 0'01 por centímetro cúbico. Por otro lado, su velocidad tiene que ser similar a la del Sol, dado que se mueven en el mismo pozo de potencial gravitacional, es decir del orden de unos cien kilómetros por segundo. Multiplicando la densidad por la velocidad, se obtiene un flujo aproximado de cien mil neutralinos que cada segundo atraviesan un centímetro cuadrado terrestre. Por ejemplo, cada segundo todos esos neutralinos están atravesando un centímetro cuadrado de nuestra piel. Aunque aparentemente este número es muy grande, como los neutralinos interactúan débilmente con la materia, esto hace que su detección sea en realidad muy difícil: la mayor parte de ellos atravesarán un detector limpiamente.

En cualquier caso, como sugirieron por primera vez los norteamericanos Goodman y Witten en 1985, la detección experimental de la materia oscura a través del choque elástico con los núcleos de un detector, como se muestra en el esquema de la izquierda de la figura 29, es en principio posible. En el diagrama de la derecha de la figura 29 se muestra lo que realmente ocurre a nivel subatómico: el neutralino interactúa con uno de los quarks que forman los protones o neutrones de los núcleos atómicos del material, a través del intercambio de partículas de Higgs. Eso es lo que produce que el núcleo retroceda. Otros diagramas de interacción intercambiando por ejemplo squarks son también posibles. Todos estos diagramas son semejantes a los que discutimos en las figuras 1 y 5 pero con partículas intercambiadas distintas. Se puede hacer un cálculo aproximado del número de choques que se producirían. Para un neutralino con las características discutida anteriormente y con un material típico en el detector con núcleos atómicos formados por unos cien

protones y neutrones, habría entre 0.01 y 1 choque por kilogramo de material y por día. Esto quiere decir que, dependiendo del número de kilogramos, cada día unos pocos neutralinos golpearán un núcleo atómico en el detector. Cuanto más grande sea nuestro detector, mas choques seremos capaces de observar y mejor estadística tendremos para confirmar que la materia oscura está a nuestro alrededor.

Para detectar los choques se mide la energía producida por el retroceso nuclear después del choque y para ello los experimentales usan varias técnicas. Pueden medir la ionización producida en el material, la emisión de fotones en el caso de cristales centelleadores o un pequeñísimo aumento en la temperatura del material. Todas estas medidas son muy complicadas y son necesarias técnicas extremadamente precisas. La razón básica es que la energía producida por el choque es muy

pequeña. Para el neutralino típico que estamos usando en esta discusión, que tiene una energía cinética de unos cien mil electrón-voltios, la energía máxima transferida a un núcleo en el detector es solamente de unos pocos miles de electrón-voltios. Muy difícil de medir. Mucho más si cabe teniendo en cuenta que rayos cósmicos con energías entre miles y millones de electrón-voltios están continuamente bombardeando la superficie terrestre, como se muestra en la figura 30. Está claro que los experimentos deben ser llevados a cabo de manera extremadamente cuidadosa para no confundir la señal debida a la materia oscura con la producida por un rayo cósmico. Por esta razón es

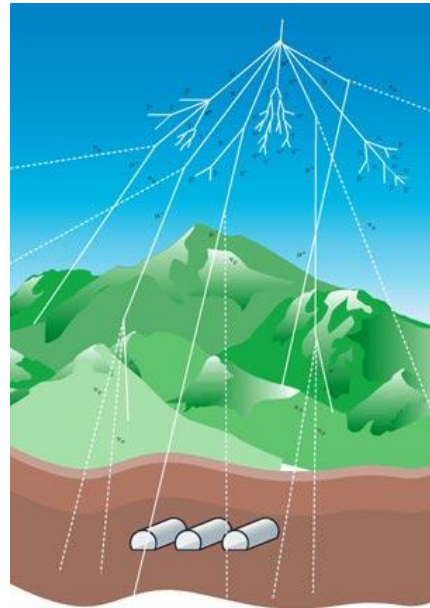


Figura 30: Laboratorio subterráneo protegido por una montaña del bombardeo de rayos cósmicos.

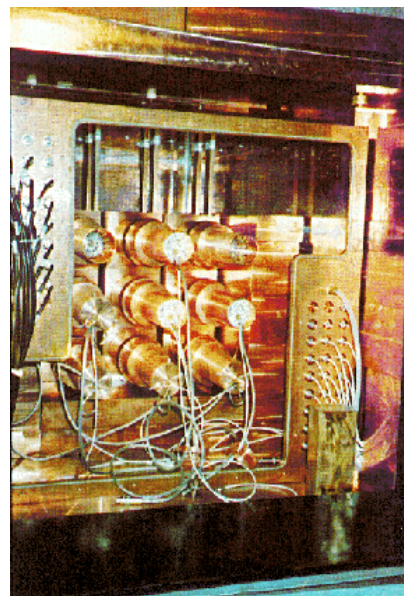
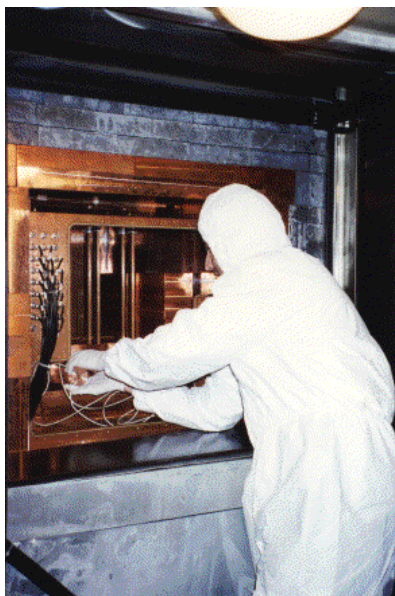


Figura 31: (Izquierda) Instalación de uno de los cristales en un experimento. (Derecha) Todos los cristales ya instalados.

conveniente realizar los experimentos en lugares subterráneos, donde los detectores están protegidos por capas de rocas de los rayos cósmicos. Incluso esto no es suficiente porque la radiactividad de las rocas e incluso de los propios materiales del detector puede producir señales engañosas. Todos estos factores deben ser tenidos en cuenta a la hora de proteger lo máximo posible el experimento.

En la figura 31 se muestra la instalación de un detector formado por nueve cristales de material con un total de unos cien kilogramos. Como se puede ver, este tipo de experimentos se llevan a cabo en espacios del tamaño de una habitación. Nada que ver, ni en tamaño ni en coste, con experimentos como el gigantesco acelerador LHC. En todo el mundo hay numerosos experimentos de detección de materia oscura usando distintos tipos de materiales y técnicas de detección. Para el futuro se están proyectando experimentos bastante más grandes que los actuales, conteniendo hasta una tonelada de material.

Es importante reseñar que este tipo de experimentos en laboratorios subterráneos no son los únicos posibles. Son también muy interesantes los experimentos que se llevan a cabo para detectar la materia oscura de forma indirecta. Unos se basan en que la materia oscura que pasa a través del Sol puede disminuir su velocidad por debajo de la velocidad de escape debido a los choques elásticos con los núcleos solares y como consecuencia quedar atrapada. Esta materia se irá acumulando en el centro del Sol por efectos gravitacionales y finalmente se aniquilará a través de procesos como el que se ve por ejemplo en la figura 32. Los productos de la aniquilación pueden ser neutrinos, positrones, antiprotones, fotones de alta energía (rayos gamma), etc. En el caso de los neutrinos, éstos se pueden detectar en la Tierra gracias a que producen muones al interactuar con las rocas. Hoy en día existen experimentos con detectores colocados bajo el agua del mar para observar la radiación Cherenkov que emitirían los muones al moverse a mayor velocidad que la luz en el agua. En la figura 33 puede verse uno de estos experimentos en el Mar Mediterráneo donde cubre una extensión de diez mil metros

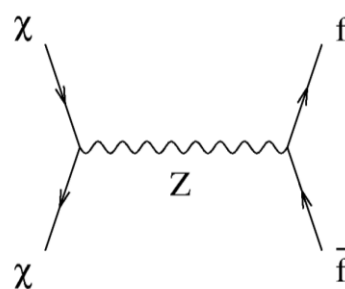


Figura 32: Ejemplo de un diagrama de aniquilación de neutralinos a través de una Z . En este caso produciendo fermiones.

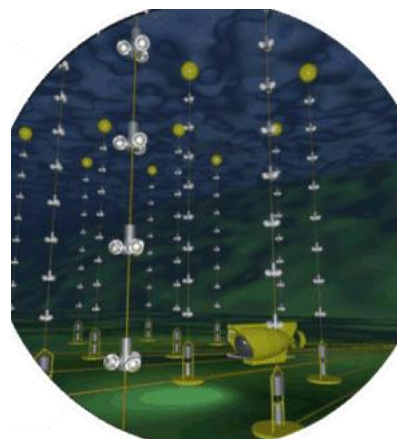


Figura 33: Detectores de muones bajo el mar.



Figura 34: Situación de algunos detectores de muones bajo el hielo polar.

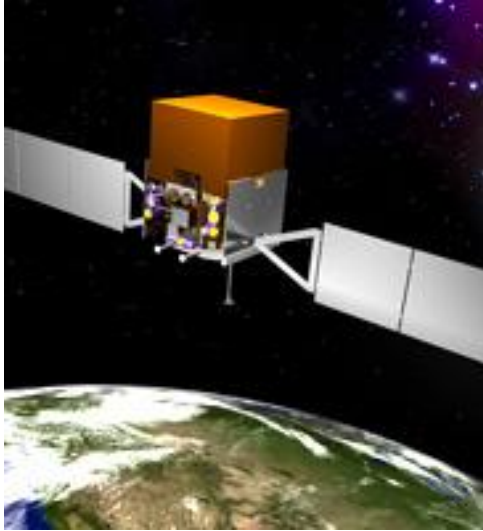


Figura 35: *Satélite portando un experimento para detectar rayos gamma y antimateria.*



Figura 36: *Telescopio Cherenkov para detectar rayos gamma.*

cuadrados. En el futuro se proyectan experimentos cubriendo hasta un millón de metros cuadrados. También se colocan los detectores bajo el hielo polar como puede verse en el experimento de la figura 34 en el Polo Sur.

Otro tipo de experimentos de detección indirecta tratan de observar los productos de la aniquilación de la materia oscura pero en el halo galáctico. Para intentar detectar este tipo de señales se usan experimentos a bordo de satélites y también telescopios de radiación Cherenkov como los que podemos observar en las figuras 35 y 36.

Vemos por tanto que la detección de la materia oscura es un campo muy activo en todo el mundo, con numerosos experimentos funcionando y otros en fase de proyecto, y en este sentido podemos tener esperanzas de que en un futuro más o menos próximo se descubrirá por fin la naturaleza de la materia oscura.

CONCLUSIÓN Y PERSPECTIVAS

Tan sólo cuatro interacciones entre las partículas-nuclear fuerte, nuclear débil, electromagnética y gravitacional-son suficientes para dar cuenta de todas las estructuras existentes en el Universo. La interacción nuclear fuerte mantiene unidos a los quarks por medio del intercambio de gluones, dando lugar a los protones y los neutrones. Así mismo, es la interacción responsable de mantener unidos a los protones y neutrones formando el núcleo del átomo. La interacción electromagnética mantiene unidos el núcleo atómico y los electrones por medio del intercambio de fotones, formando los átomos. La interacción nuclear débil produce la llamada desintegración beta del núcleo a través del intercambio de las W y Z . Los neutrinos también participan en este proceso, que además es fundamental para generar las reacciones de fusión que se producen en el Sol y sin las cuales no habría vida en la Tierra. Por último, la gravedad mantiene a los seres humanos sobre la Tierra, a los planetas en sus órbitas alrededor del Sol, a las estrellas formando las galaxias,

a las galaxias formando los cúmulos de galaxias y así sucesivamente hasta el Universo entero.

La estructura de la materia queda por tanto explicada por el Modelo Estándar de la física de partículas, que se basa en las tres primeras interacciones mencionadas anteriormente y en la existencia de tres familias de partículas elementales (véase el lado izquierdo de la figura 24). El Modelo Estándar ha sido comprobado experimentalmente hace años en el acelerador LEP del CERN. Llegados a este punto, creo que deberíamos estar de acuerdo en que el poder unificador de la física es impresionante. Todos los fenómenos que se observan en el Universo tienen su origen en un conjunto pequeño de partículas elementales y nada más que cuatro fuerzas—siendo los propios mensajeros de las fuerzas también partículas elementales. Sin embargo, también hay que reconocer que todavía quedan cuestiones importantes por responder. Por ejemplo, ¿existe el *Higgs*?, pieza fundamental para generar las masas de las partículas elementales, ¿Por qué hay tres familias de partículas y por qué tienen masas tan distintas? ¿Existen las partículas supersimétricas como consecuencia de una nueva simetría de la Naturaleza entre bosones y fermiones llamada Supersimetría? Afortunadamente, el acelerador LHC del CERN nos ayudará a responder estas cuestiones cruciales en los próximos años.

Dado que la materia oscura que constituye el 85% de toda la materia existente en el Universo no puede estar formada por las partículas del Modelo Estándar, la detección de las partículas supersimétricas en el LHC sería además un indicio de que la materia oscura podría estar formada por ellas. La caza de la materia oscura está en marcha y existen en todo el mundo numerosos experimentos para detectarla. Hay experimentos subterráneos de detección directa a través de los choques de la materia oscura con los materiales de los detectores. Y hay también experimentos de detección indirecta a través del análisis de los productos de su aniquilación en el Sol o en el halo galáctico. Estos últimos se llevan a cabo bajo el hielo polar o el agua del mar y en telescopios Cherenkov sobre la superficie Terrestre y en satélites.

Aunque la detección en el futuro de la materia oscura nos pueda parecer que dejaría solucionado el problema de la composición del Universo, lo cierto es que todavía quedaría un problema por resolver. Recientes resultados observacionales apuntan a que la expansión del Universo se está acelerando y que ello es debido a la existencia de una misteriosa energía (llamada oscura por nuestro desconocimiento acerca de su origen) que permea todo el espacio. De ser así, el Universo estaría hecho de un 73% de energía oscura, un 23% de materia oscura y un 4% de materia ordinaria, como puede verse en la figura 37. El origen de la energía oscura es otro de los grandes misterios que quedan por resolver.

Desde el punto de vista de la evolución del Universo también quedan cuestiones abiertas. Vimos como el Modelo Estándar nos proporciona una explicación de lo que sucedió en el Universo desde que tenía una edad de 10^{-10} segundos (figura 20), pero, ¿qué sucedió antes? Posiblemente hubo un período inflacionario en el que el Universo se expandió de manera exponencial. Se cree que la inflación fue originada por un campo llamado inflatón a través de un mecanismo semejante al mecanismo de Higgs, aunque todavía no hay un candidato claro a inflatón en física de partículas. El análisis teórico de la inflación y su confirmación a través de sus posibles consecuencias

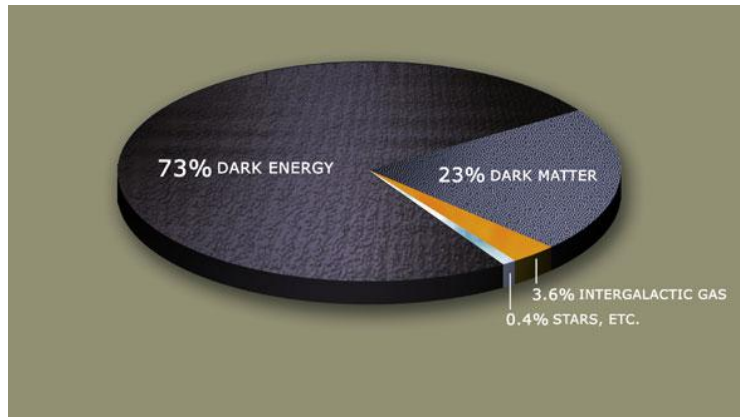


Figura 37: Composición del Universo. La materia oscura constituye el 85% de toda la materia del Universo, pero sólo el 23% de la totalidad del Universo

observacionales es uno de los campos más activos de la cosmología actual. Y antes de la inflación quizás hubo un período en donde todas las interacciones fundamentales de la Naturaleza estaban unificadas. Y antes de eso, en el instante inicial, se produjo el *Big Bang*, ¿qué lo produjo?, ¿quizás un efecto túnel cuántico que dio lugar a una transición de la nada al espacio-tiempo en que nos encontramos?

Hemos mencionado antes la unificación de las interacciones. Puede decirse que éste es el objetivo fundamental de los físicos de partículas hoy en día. La teoría que la llevase a cabo debería unificar todas las fuerzas y las partículas de la naturaleza en una descripción común. Que la tarea no es nada sencilla lo podemos entender si nos acordamos de que uno de los grandes científicos de la historia, Einstein, pasó los últimos 30 años de su vida buscando una teoría unificada de la gravitación y el electromagnetismo, sin éxito. Desde entonces, hemos visto a lo largo de esta charla como otras dos interacciones fundamentales-nuclear fuerte y débil-fueron descubiertas y como la interacción electromagnética está íntimamente relacionada con ellas, constituyendo el Modelo Estándar. También se han propuesto las llamadas Teoría de Gran Unificación que tratan de unificar estas tres últimas interacciones en un único grupo gauge, como por ejemplo $SU(5)$ que contiene a $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$. Sin embargo, al igual que le sucedió a Einstein, el gran problema es la gravitación.

Einstein, en su Teoría General de la Relatividad nos explicó que los objetos masivos curvan el espacio que los rodea, y que por tanto para explicar el hecho de que dos objetos se atraigan no hace falta introducir el concepto de fuerza Newtoniana. Los objetos están obligados a seguir las trayectorias observadas debido a que el espacio está curvado. En vez de seguir líneas rectas siguen curvas llamadas geodésicas. Todos los resultados experimentales, desde la curvatura en la trayectoria de un fotón emitido por una estrella al pasar cerca del Sol, hasta el avance en el perihelio de Mercurio o la expansión del Universo, confirman la teoría de Einstein. Pero hemos visto a lo largo de esta charla que las fuerzas fundamentales (no gravitacionales) de la Naturaleza son de origen cuántico y tienen asociadas por tanto unos cuantos fundamentales que las transmiten. De la misma forma, uno esperaría que la Teoría General de la Relatividad, siendo una teoría clásica, tendría que ser cuantizada. En una teoría cuántica de la gravedad el concepto de curvatura del espacio-tiempo

seguiría siendo válido, pero además el propio espacio-tiempo estaría cuantizado. El cuanto asociado es el llamado *gravitón*, el equivalente al fotón en el electromagnetismo, y éste transmitiría la información entre los distintos objetos. Desgraciadamente, no se ha podido conseguir todavía una teoría cuántica de la gravedad consistente desde el punto de vista matemático. La teoría está plagada de infinitos

En los últimos años la llamada Teoría de Cuerdas, en cuyo contexto una teoría cuántica de la gravedad parece factible, ha emergido como la mejor candidata para llevar a cabo el objetivo de la unificación de todas las interacciones. En esta teoría se sigue usando como base, al igual que en el Modelo Estándar, la Mecánica Cuántica y la Teoría de la Relatividad Especial, pero se modifica la hipótesis de que las partículas puntuales son los objetos fundamentales. El objeto fundamental pasa a ser extenso, una cuerda de longitud extremadamente pequeña (alrededor de 10^{-33} centímetros), y el mundo resulta estar hecho nada más que de cuerdas. En una visión simplificada, de la misma manera que la cuerda de un violín unifica los tonos musicales, una cuerda fundamental unifica las distintas fuerzas y partículas de la naturaleza. Las notas musicales no son fundamentales, surgen de las cuerdas del violín. Las fuerzas y partículas no son fundamentales, son simplemente los distintos modos de vibración de una cuerda fundamental. Aunque la belleza y la elegancia de la teoría de cuerdas es notable, la esencia de la teoría no se comprende bien. Harán falta todavía muchos años de investigación antes de establecer si es realmente la teoría final de la materia.