

El gran acelerador de hadrones (LHC) y la búsqueda de la partícula divina

G. Sánchez

El acelerador más grande nunca construido, el LHC, está realizando sus últimas pruebas. Sólo el acelerador requiere una potencia de 120 MW (800 000 MWh/año) que serán suministrados desde las centrales nucleares francesas. ¿Qué tiene de especial el LHC que no tengan otros superaceleradores? ¿Qué son los hadrones? ¿Qué es el bosón de Higgs? ¿Qué aprenderemos? ¿Merece la pena gastar miles de millones de euros en instalaciones como ésta? Este artículo intentará dar respuesta a estas preguntas.

The Large Hadron Collider (LHC) is a particle circular accelerator of 27 km of circumference. It will be used to study the smallest known particles. Two beams of subatomic particles called 'hadrons' – either protons or lead ions – will travel in opposite directions inside the circular accelerator, gaining energy with every lap. Physicists will use the LHC to recreate the conditions just after the Big Bang, by colliding the two beams head-on at very high energy. There are many theories as to what will result from these collisions, but what's for sure is that a brave new world of physics will emerge from the new accelerator, as knowledge in particle physics goes on to describe the workings of the Universe. For decades, the Standard Model of particle physics has served physicists well as a means of understanding the fundamental laws of Nature, but it does not tell the whole story. Only experimental data using the higher energies reached by the LHC can push knowledge forward, challenging those who seek confirmation of established knowledge, and those who dare to dream beyond the paradigm. One of the main goals is to find the Higgs boson.



GUILLERMO SÁNCHEZ
trabaja en ENUSA Industrias Avanzadas S.A. desde 1983. Enseña Matemáticas en la Universidad de Salamanca.

El pasado 10 de septiembre a las 10:28 (hora española) un haz de protones recorrió por primera vez los 27 km del anillo del gran colisionador de hadrones (LHC), situado al lado de Ginebra. Fue un paso importante, pero todavía quedan meses y muchas dificultades que superar hasta que el LHC funcione a pleno rendimiento. Entonces sucesivos paquetes de protones serán acelerados en direcciones opuestas, chocando a velocidades próximas a la de la luz. Algunos de los protones se fragmentarán en un número ingente de partículas. Entre ellas se espera encontrar al huraño bosón de Higgs, que en la jerga de los físicos teóricos es también conocido como la partícula divina, y es que lo que se busca tiene connotaciones teológicas para muchos. El LHC está siendo objeto de un seguimiento mediático como pocos sucesos científicos, despertando inquietudes apocalípticas.

EL MODELO ESTÁNDAR

El LHC es la versión más actual de una serie de experimentos que se iniciaron con Lord Rutherford en 1911 encaminados a conocer la estructura de la materia. En un celeberrimo experimento, bombardeó con partículas alfa una delgada lámina de oro. Su sorpresa fue encontrar que el átomo era una estructura prácticamente vacía con un pequeño núcleo en su centro. El LHC pretende hacer algo similar con los protones. Durante años los protones se consideraron partículas elementales, y como tales indivisibles. A mediados del siglo XX se supo que no era así (figura 1). Varios de los más eminentes físicos del periodo que va de 1960 a 1975 fueron elaborando un modelo que permitiese explicar la constitución de la materia y sus leyes. El resultado de todo ello fue un desarrollo teórico conocido como cromodinámica cuántica (QCD), que desembocó en el llamado *modelo estándar*.



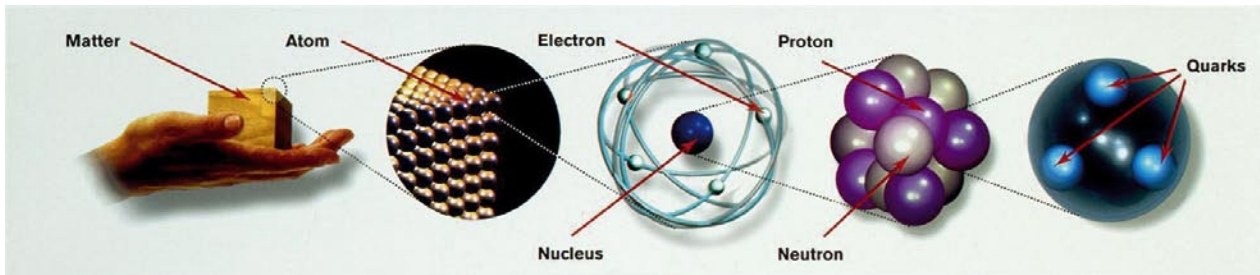


Figura 1. La materia ordinaria en última instancia son quarks q y u (al menos hasta ahora).

Los Quarks son partículas de las que están constituidos los protones y neutrones y otras partículas mucho más energéticas. Nunca han sido observados de forma aislada.

Carga	u (Up)	d (Down)
Masa	+2/3 2 MeV	-1/3 5 MeV
Carga	c (Charm)	s (Strange)
Masa	+2/3 1.25 GeV	-1/3 95 MeV
Carga	t (Top)	b (Bottom)
Masa	+2/3 171 GeV	-1/3 4.2 GeV

Tabla 1. QUARKS.

Los Leptones son partículas inmunes a la fuerza fuerte. Se pueden observar aisladamente. En los neutrinos no se ha observado masa, se espera que sea de algunos eV.

Carga	Electrón	Neutrino electrónico
Masa	-1 0.511 MeV	0
Propiedades	Responsable de la electricidad y de las reacciones químicas	Apenas interactúa. Es fundamental en la radiactividad.
Carga	Muón	Neutrino muónico
Masa	-1 106 GeV	0
Propiedades	Parecido al electrón pero más pesado. Se desintegran con un semiperiodo de 2.2 μs. Se observa en los rayos cósmicos	Aparece en reacciones donde interviene el muón
Carga	Tau	Neutrino taónico
Masa	-1 1.78 GeV	0
Propiedades	Parecido al electrón pero mucho más pesado. De vida brevísima. Se desintegran con un semiperiodo de 3 ps. Rayos cósmicos.	Aparece en reacciones donde interviene el leptón tau

Tabla 2. LEPTONES.

El modelo estándar establece que todo cuanto conocemos está formado por dos tipos de partículas y sus correspondientes antipartículas: los quarks (tabla I) y los leptones (tabla II), que interactúan entre sí por medio de tres tipos de fuerza (electromagnética, nuclear

fuerte y electrodébil). Estas fuerzas o interacciones son transmitidas por partículas especializadas llamadas bosones (tabla III). De acuerdo con el modelo, estos tres tipos de interacciones al nivel más fundamental son las tres formas de manifestarse de una fuerza única. La

otra gran fuerza de la naturaleza es la gravedad que queda fuera del modelo estándar. La gravedad es explicada por la teoría general de la relatividad. La lógica nos dice que debe existir una teoría más fundamental que unifique todas las fuerzas, que se convertiría en la Teoría de la Gran Unificación (TGU). Algunos de los mejores cerebros están dedicando sus esfuerzos a la búsqueda de una TGU. El propio Einstein dedicó a ello más de 30 años de forma infructuosa. Hay varias líneas abiertas (supercuerdas, teoría M, gravitación cuántica, etc.) pero parece que estamos lejos de encontrarla. Los físicos se encuentran en la misma situación que los caballeros del rey Arturo en la búsqueda del Santo Grial.

Según el modelo estándar (desde ahora ME) los seis tipos de quarks (y sus correspondientes antiquarks) no se presentan de forma individual, sino que forman agrupaciones, que es lo que conocemos como hadrones. La materia ordinaria está formada por sólo dos tipos de quarks: quark u (up o arriba) y quark d (down o abajo), que se agrupan formando tripletes. El protón está formado por dos quark u y un quark d; el neutrón por dos quark d y un quark u. El quark u tiene carga eléctrica +2/3 y el d -1/3, de ahí que la carga del protón sea $2/3 + 2/3 - 1/3 = +1$ y la del neutrón $2/3 - 1/3 - 1/3 = 0$. Los otros cuatro tipos de quarks sólo se presentarían como constituyentes de partículas supermásicas, para lo que se necesitan condiciones energéticas muy elevadas que ni siquiera se alcanzan en el centro de las estrellas comunes como el Sol. Esta energía sólo se da en casos muy especiales (estrellas de neutrones, quásares y en algún otro objeto exótico) o tal vez en formas de la materia nunca observadas. Condiciones tan energéticas también debieron darse en los primeros instantes del Big Bang que dio lugar a nuestro Universo.

Algo similar ocurre con los transmisores de fuerza o bosones. Sólo el fotón puede ser observado fácilmente. Para detectar los otros bosones (Z, W, g) se requieren energías enormes. Por medio de aceleradores cada vez más potentes se han ido detectando los distintos tipos de quarks y los bosones. El último fue el quark t (top o cima) cuyo descubrimiento, en el acelerador Tevatrón del Fermilab, se anunció en 1995.

Los Bosones son las partículas responsables de transmitir las fuerzas		
Carga Masa Propiedades	Fotón 0 0 Responsable de la radiación electromagnética. Actúa sobre las partículas cargadas a distancias limitadas.	Bosones W⁺/W⁻ +1 o -1 80.4 GeV Interacciones débiles en las que cambian de identidad las partículas. Actúa a distancias cortísimas.
	Bosón Z 0 91 GeV Transmite las interacciones débiles en las que no cambian de identidad las partículas. Actúa a distancias cortísimas.	Gluones g 0 0 Hay 8 especies. Transmiten la interacción fuerte que actúa sobre los quarks y los otros gluones.
Carga Masa Propiedades	Higgs (No observado aún) 0 <1 TeV, quizás de 0.1 a 0.2 TeV Probablemente es el responsable de que tengan masa: quarks, leptones y bosones W y Z.	

Tabla 3. BOSONES.

De los otros constituyentes de la materia, los leptones (electrón, neutrinos, muón y tau), sólo el electrón es fácilmente detectable. Los neutrinos son muy escurridizos, al carecer de carga y prácticamente de masa, atravesando la materia ordinaria como si no existiese. No obstante, experimentos muy sofisticados han permitido la detección de los distintos tipos de neutrino y de los otros leptones.

El mundo que nos rodea está constituido por los quark u y d, electrones, fotones y neutrinos electrónicos. Los quark u y d forman los protones y los neutrones. Los quarks constituyen menos del 0.1% del núcleo atómico, que a su vez ocupa menos de la cienmilésima del átomo. El resto de las partículas sólo existirían a energías que se dan en algunas estrellas muy másicas y en explosiones procedentes de los confines del universo, pudiendo llegar hasta nosotros como parte de la radiación cósmica. Los seres humanos, por medio de aceleradores, hemos conseguido reproducir esas condiciones, pudiendo observarlas de forma controlada. Estas condiciones y otras mucho más extremas se dieron en las primeras fracciones de segundo posteriores al inicio del Big Bang que dio lugar a nuestro universo.

EL BOSÓN DE HIGGS Y EL PROBLEMA DE LA MASA

Hasta aquí parecería que el modelo estándar había sido totalmente verificado. Sin embargo, faltaba algo que hasta ahora no he mencionado: el mecanismo de Higgs (se llama así al bosón Higgs y su campo asociado). ¿Es realmente

tan importante su existencia? Si el ME es correcto, la existencia de la partícula y el campo de Higgs es fundamental, pues explicaría la masa de los quarks, los bosones W y Z y los leptones.

La masa nos parece tan natural que puede parecer obvia su existencia en todo lo que constituye el universo. Sin embargo, no todo tiene masa. Lo que denominamos masa ordinaria, o simplemente masa, tiene la propiedad de que un objeto que la posee cambia su velocidad al aplicarle una fuerza. Esto no ocurre con los fotones y otras partículas no másicas. El fotón, o va a la velocidad de la luz o no existe.

Desde un punto de vista estricto conviene hacer una aclaración. Todo cuanto conocemos se puede presentar como masa o en forma de energía, o como combinación de ambas formas. La energía se puede transformar en masa y a su vez la masa puede transformarse en energía de acuerdo a la equivalencia $E = mc^2$, pero no son lo mismo. De la misma forma que un billete de 50 € vale lo mismo que 50 monedas de 1 €, las dos cosas tienen el mismo valor y en determinadas condiciones se pueden intercambiar, pero no son lo mismo. En este sentido podemos decir que la energía E del fotón corresponde a una masa equivalente $m = E/c^2$. Para observar la transformación de energía en masa no se requieren laboratorios como el CERN; en cualquier pequeño laboratorio de física nuclear se detecta cómo un fotón energético puede originar un electrón y un positrón y viceversa. La transformación de masa en energía es más común,

como ocurre en un proceso de combustión ordinario, donde una cantidad insignificante de masa se convierte en energía calorífica.

En física de partículas las masas se suelen expresar, en su equivalente energético, en una unidad denominada electrón voltio, eV ($1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$) y en sus correspondientes múltiplos: keV (10^3 eV), MeV (10^6 eV), GeV (10^9 eV), TeV (10^{12} eV). Para que nos hagamos una idea, la masa en reposo del electrón es $9.1091 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ o 0.51 MeV . La del protón es 939 MeV .

¿Cómo explica el mecanismo de Higgs la masa? Según el ME, el universo estaría lleno de un campo de Higgs que los fotones y otras partículas no másicas atravesarían sin interactuar con él. Sin embargo, el campo de Higgs interactuaría con las partículas másicas a través del bosón de Higgs ofreciendo una resistencia a su desplazamiento. Su explicación no es sencilla. Utilizaré mi propia versión de una analogía que me resultó divertida cuando la leí. En un concurso de físicos pidieron una explicación del mecanismo de Higgs que pudiese ser contada al parlamento británico, y así obtener la liberación de los fondos para la participación británica en el LHC. La explicación que se dio es que el campo de Higgs tiene un comportamiento similar a lo que ocurriría si Margaret Thatcher apareciese en una plaza pública concurrida. Cuando va andando una multitud la va rodeando, agolpándose en torno a ella, en el sentido del desplazamiento. Una vez que una persona se ve sobrepasado por ella, va dejando de rodearla, pero nuevas personas de la multitud seguirán rodeándola dificultando su marcha. La multitud sería el mecanismo responsable de la "masa" de Margaret Thatcher. La mayoría de nosotros podríamos atravesar la misma plaza sin dificultad, pues las personas que en ella hubiese nos ignorarían, es decir, nos comportaríamos como objetos sin masa, seríamos como los fotones en el campo de Higgs.

La gravedad (que no es objeto del ME), sin embargo, actúa por igual sobre la masa que sobre la energía. Para la gravedad lo importante son los 50 €, no importa en que forma se paguen.

EL LHC, UNA MÁQUINA COLOSAL

Si el ME es correcto, se cree que la partícula de Higgs tendrá una energía de alrededor 0.2 TeV. Sin embargo, para que se produzcan en una cantidad suficiente para poder ser detectada se requiere sobrepasar ampliamente 1 TeV, que es la energía del mayor acelerador hasta ahora existente, el Tevatrón del Fermilab (Chicago).

En los años 80 del siglo XX, EE UU había decidido construir un acelerador con tales características (de 20 TeV),

que llamaron Supercolisionador Superconductor (SSC). Se empezó la construcción de un túnel en forma de anillo que debería llegar a tener 85 km. Cuando se llevaban construidos algo más de 20 km e invertidos 2000 millones de dólares, el proyecto se canceló en 1993.

Europa disponía desde la década de 1980 de un acelerador en el CERN para el que se había construido un túnel de 27 km entre Suiza y Francia con una profundidad media de 100 m. Se llamaba LEP, pues estaba especializado en la colisión de leptones (básicamente impactos de electrones y positrones). En él se habían obtenido éxitos importantes, como la detección del bosón W, que le valió el premio Nobel al que entonces era su director, Carlo Rubbia. Incluso en sus instalaciones se llegaron a hacer experimentos como la fisión inducida por espalación, para el que ENUSA aportó un pequeño elemento combustible.

A finales de 1994 se aprobó la construcción del acelerador circular: el Large Hadron Collider (LHC). Se aprovecharía el mismo túnel que el LEP y algunas instalaciones, con lo que se ahorraría el coste de construcción del túnel. El LEP quedó desmantelado en el año 2000, y su lugar fue poco a poco siendo ocupado por los nuevos equipos para el LHC. Como objetivo de diseño se fijó 7 TeV. Aunque menor que la prevista para el cancelado SSC, sería suficiente para detectar los bosones Higgs (si es que el ME es correcto). El diámetro del LHC era considerablemente menor que el del frustrado SSC, y por tanto se necesitaría un campo magnético más intenso, pues los protones tendrían que seguir una trayectoria más curva. El SSC iba a utilizar imanes superconductores, pero de una tecnología menos innovadora que la prevista para LHC.

El conjunto de las instalaciones del LHC lo constituyen varios anillos de distintos tamaños. En todos ellos se emplean imanes para generar un campo magnético intenso que acelere y curve la trayectoria de los haces de protones dentro de cada anillo o para transferirlos al anillo siguiente. El proceso que siguen los protones es el siguiente (figura 2):

Se toma hidrógeno de un recipiente. El hidrógeno es ionizado arrancándole los electrones, con lo que nos quedan sólo protones. El flujo de protones va pasando por los distintos anillos, en cada uno de los cuales es acelerado, y por tanto se va incrementando su energía. En la penúltima etapa alcanza 450 GeV. Entonces un flujo de protones es introducido en uno de los dos anillos paralelos que forman el LHC. En un anillo los protones circulan en el sentido dextrógiro (el mismo que las agujas del reloj) y en el otro levógiro (inverso al

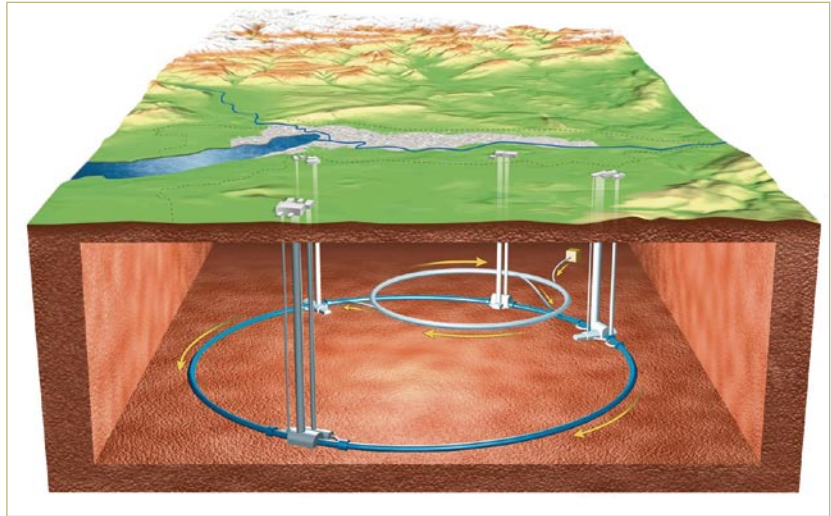


Figura 2. Una visión general del LHC. Fuente CERN.

de las agujas del reloj). En cada uno de estos anillos los protones son acelerados unos 20 minutos hasta alcanzar 7 TeV. En esas condiciones permanecerán varias horas. Periódicamente, los flujos de los dos anillos se desvían ligeramente para que los protones choquen frontalmente. La energía del choque llega a ser 14 TeV.

Se prevé que el LHC también se utilice para acelerar y enfrentar iones pesados. En concreto, se piensan utilizar átomos de plomo ionizado a los que se conferirá una energía de 2.7 TeV por ión.

¿Cómo se consigue que una partícula tan pequeña como un protón pueda chocar con otro? Esto no es nuevo, pues en otros aceleradores ya se venía consiguiendo, pero en el LHC los requisitos técnicos son mucho más exigentes. Por ejemplo, el efecto gravitatorio de la Luna en un ciclo lunar modifica el tamaño del LHC en 1 mm y el de la energía de los protones en 0.02%, ambos efectos deben ser tenidos en cuenta. El vacío requerido en los tubos por donde circulan los protones debe ser de 10^{-13} atm, muy inferior al de la Luna. Los protones circulan por el LHC en paquetes. Cada paquete es una agrupación de cien mil millones (10^{11}) de protones en una especie de cilindro de unas micras de diámetro y pocos cm de longitud. Cada protón irá al 99.9999991% de la velocidad de la luz. A esta velocidad la masa equivalente de un protón es 7000 veces la del protón en reposo. En un mismo experimento pueden encontrarse circulando por el LHC unos 3000 paquetes como éstos. En un determinado momento los paquetes que circulan en sentido levógiro se lanzan contra los que circulan en sentido dextrógiro (en total hay cuatro puntos de cruce en los 27 km). De los doscientos mil millones que se cruzan, unos 20 chocan. Como el número de cruces es muy alto (31 millones por segundo), en total

se producirán 620 millones de choques por segundo. De los 14 TeV que se generan en un impacto, los fragmentos más energéticos resultantes como máximo tendrán 2 TeV. De cada 1500 millones de choques (es decir una vez cada 2.5 s) se espera que un impacto sea una partícula Higgs.

Un problema enorme es la detección e identificación de las partículas producidas en las colisiones. En muchos casos las partículas no se observan directamente, como es en el caso de los quarks, sino que es deducida su existencia a partir del análisis de las trayectorias de las partículas secundarias que generan. Para ello se dispone de 4 detectores gigantes (el más grande del tamaño de la catedral de León), con una destacada participación española (tabla 4), que pueden llegar a producir datos suficientes para ocupar 10000 DVDs por segundo. Naturalmente, no hay sistema informático con esta capacidad de almacenamiento. Para ello ha sido necesario desarrollar una especie de sistema "antispam" que seleccione una pequeña fracción de estos datos, que será susceptible de un tratamiento posterior. Esta información depurada será distribuida entre distintos centros de tratamiento de datos para su análisis. Con tal fin se ha creado una malla mundial, asignando a una decena de centros la categoría de primer nivel (TIER-1 en denominación CERN). En España disponemos de uno de estos centros. Para ello se ha creado el PIC (Puerta de Información Científica) en el que participan la Universidad Autónoma de Barcelona, el CIEMAT, el Programa Nacional de Física de Partículas y el Instituto de Física de Altas Energías.

Cada haz de protones puede alcanzar una energía 350 MJ (equivalente a un tren de 400 t a 150 km/h, suficiente para fundir 500 kg de cobre. La energía almacenada

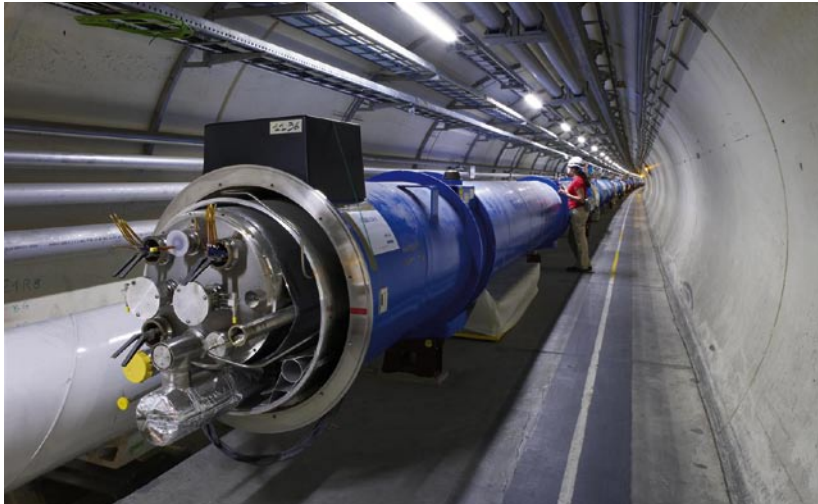


Figura 3. Los imanes superconductores son un componente fundamental. Fuente CERN.

en los imanes es 30 veces más alta (11 GJ). Otra dificultad es mantener las condiciones superconductoras de los imanes (figura 3). Algunos utilizan helio superfluido que tiene que mantenerse a una temperatura de 1,9 K (-271,3 °C). Cualquier fallo en estos sistemas que obligue a vaciar el circuito de helio requerirá varias semanas de parada, que es el tiempo necesario para volver a enfriar el sistema lo suficiente. Con esta energía y materiales, y con tolerancias tan estrictas, no es extraño que se produzcan averías en las instalaciones, como las que están ocurriendo.

Algunos han planteado problemas mucho más exóticos, como es la formación de un agujero negro que acabaría por engullir La Tierra. Este tipo de especulaciones tiene más que ver con la fantasía que con la ciencia. Aun así, el tema fue tomado muy en serio por el CERN, en cuya web se puede encontrar el análisis de las hipótesis más apocalípticas. Entre otras cosas, se justifica la carencia de este tipo de riesgo, con el hecho de que continuamente somos bombardeados por rayos cósmicos con partículas más energéticas que las que se producirán en el LHC. La diferencia es que en el LHC se generarán de forma controlada, permitiendo su estudio.

¿QUÉ QUEDA POR DESCUBRIR?

En el momento de escribir esto (septiembre de 2008) acaban de empezar las primeras pruebas con haces de protones, pero quedan meses hasta que el LHC llegue a funcionar en las condiciones para las que está proyectado. Entonces, ¿qué esperamos encontrar? Si no hay sorpresas, se habrá detectado la partícula de Higgs y se habrán medido con mucha más precisión las características de las partículas que forman el modelo estándar. En definitiva, el modelo estándar se habrá confirmado y tendremos un conocimiento más exacto de nuestro Universo.

Además, se habrán desarrollado considerablemente algunas tecnologías que podrán ser transferidas a otros campos. Por ejemplo, se espera que los avances en imanes de superconducción puedan ser de utilidad en el ITER (el gran proyecto para obtener fusión controlada).

Sin embargo, muchos científicos esperan encontrarse con hechos inesperados; en otros proyectos similares así ocurrió. La temperatura que se alcanzará en algunos zonas de los paquetes en colisión será de 2000 millones de grados, 100000 veces mayor que la que se da en el núcleo del Sol. A esa temperatura nos

encontramos en un estado en el que la materia forma un plasma de quarks y gluones, situación que, con la excepción de estrellas supermásicas y explosiones gamma, sólo se dio 10^{-20} s después del *Big Bang*. Muchos sospechan que el modelo estándar pueda no ser válido para esas energías y puedan ponerse de manifiesto fenómenos hasta ahora no observados, por ejemplo la aparición de las dimensiones ocultas predichas por las teorías de la supercuerdas, microagujeros negros que sobrevivirían fracciones de segundos, supersimetrías, etc.

Además, el propio modelo estándar está lejos de ser una teoría final. El modelo parte de la existencia de un tipo de partículas con unas energías determinadas que requieren ser medidas experimentalmente. Pero, ¿por qué esas partículas toman precisamente esos valores? (ej.: ¿Por qué el electrón tiene una masa de 0,51 MeV y no otro valor?). Por ello, para los que se plantean si los 6000 millones de euros del proyecto sirven para algo, me viene a la mente citar el diálogo entre las brujas en Macbeth de Shakespeare:

*If you can look into the seeds of time,
And say which grain will grow and
which will not,
Speak then to me.*

(Si puedes ver en las semillas del tiempo, y decir qué grano germinará y cual no, entonces háblame).

En cualquier caso, creo que es preferible gastar una pequeña parte del dinero público en entender nuestro mundo que dilapidar cantidades muy superiores en arreglar aventuras financieras o bélicas.

BIBLIOGRAFÍA

- La mejor información (en inglés y francés) sobre el LHC es la de la web del CERN (<http://www.cern.ch>) con enlaces a numerosas publicaciones relacionadas.
- La revista *Investigación y Ciencia* viene publicando numerosos artículos relativos a los últimos desarrollos en física de partículas. En el número de abril 2008 incluye un informe especial sobre el asunto.
- Sobre el modelo estándar hay excelentes libros como:
 - *Electrones, Neutrinos y Quarks*, 2001. F.J. Ynduráin. Ed. Crítica. 2001
 - *Partículas Elementales*. Gerard 't Hooft. Ed. Crítica. 2001
 - *La partícula divina*. Leon Lederman Ed. Crítica. 1996
 - *El sueño de una teoría final*. Steven Weinberg. Ed. Crítica. 1994. ■

LHC habrá cuatro grandes detectores (o 4 grandes experimentos): CMS, ATLAS, LHC-B y ALICE. En los 4 participan grupos españoles:

- En CMS participa el CIEMAT, el Instituto de Física de Cantabria (IFIC), la Universidad Autónoma de Madrid (UAM) y la Universidad de Oviedo.
- En ATLAS, el Instituto de Física de Altas Energías de Barcelona, el IFIC (Valencia) y la UAM.
- En LHC-B, la Universidad Central de Barcelona y la Universidad de Santiago de Compostela.
- En ALICE, el CIEMAT y la Universidad de Santiago de Compostela.

Además, la unidad de superconductividad del CIEMAT desarrolló diversos prototipos de imanes para el LHC, que han permitido que una empresa española (ANTEC) fabrique un número importante de los imanes (1500 sextupolos y 200 octupolos) hoy instalados en el acelerador.

Tabla 4. La participación española en el LHC.