

EN LAS FRONTERAS DE LA FÍSICA:

1. El Gran Colisionador Hadrónico (LHC), una catedral de la ciencia para desvelar los secretos de la materia

Dr. Juan Antonio Fuster Verdú.

*Profesor de Investigación del CSIC y miembro del Instituto de Física Corpuscular (IFIC),
CSIC/Universidad de Valencia.*

Actualmente Gestor del Área Nacional de Física de Partículas.

La Física de Altas Energías observa el comportamiento de la materia a las escalas más pequeñas. Su fin es conocer cuáles son los componentes fundamentales (sin estructura) de la materia y las fuerzas que actúan entre ellos. Dar respuesta a estas cuestiones no es una actividad científica de reciente aparición. Sus orígenes se remontan a los tiempos de la Grecia clásica. Empédocles, en el siglo V a.C., fue el primero en proponer una teoría filosófica de los elementos y las fuerzas que actuaban entre ellos. Más tarde, Demócrito sugirió que la materia estaba compuesta de unidades indivisibles a las que denominó átomos. Y fue el químico inglés John Dalton, en el siglo XIX, quien reactivó la idea de Demócrito al proponer que cada elemento químico está compuesto de átomos distintos. Sin embargo, la gran profusión de elementos químicos encontrados así como las regularidades que, por grupos, presentaban en su comportamiento hizo suponer que éstos no eran los componentes últimos de la materia.

En el siglo XX, dos nuevas teorías, la Mecánica Cuántica y la Teoría de la Relatividad, proporcionan nuevas ideas y líneas de trabajo que dan un soberbio empuje a nuestros conocimientos. Empíricamente se demuestra que los átomos no son los componentes últimos de la materia, sino que poseen estructura. Gracias a los experimentos de científicos como Rutherford, se observa que la materia está esencialmente vacía: en los átomos, casi toda la materia se concentra en un núcleo central compuesto de protones y neutrones. Una nube de electrones que rodea al núcleo garantiza la neutralidad eléctrica de los diferentes elementos químicos.

El desarrollo tecnológico experimentado durante el siglo XX en el campo de los aceleradores y colisionadores, así como en el de técnicas de detección permitió descubrir, en experimentos con rayos cósmicos y más tarde con haces artificiales, un gran número de nuevas partículas: muones, piones, kaones, etc. Asimismo se descubrió la existencia de la antimateria: partículas con la misma masa que las partículas de materia pero con otras propiedades, como por ejemplo la carga eléctrica, opuestas a las de las partículas. Todas estas partículas sabemos que interactúan a través de cuatro fuerzas fundamentales: la gravitatoria, la electromagnética, la débil (responsable de las desintegraciones radiactivas) y la fuerte (responsable de unir protones y neutrones en los núcleos atómicos).

El creciente número de descubrimientos llevó una vez más a replantearse el concepto de partícula elemental. Actualmente consideramos que las partículas elementales son de tres tipos: los leptones (partículas que no interactúan fuertemente), los quarks (partículas que sí interactúan fuertemente) y las partículas mediadoras de las interacciones. En la Figura 1 mostramos una clasificación de las partículas elementales. El fotón es la partícula responsable de las interacciones electromagnéticas, las W^\pm y la Z se intercambian en las interacciones débiles y los ocho gluones son los responsables de la fuerza fuerte. A los

leptones y los quarks se les conoce en nuestro argot como campos de materia. Como puede apreciarse en la Figura 1 aparecen agrupados en tres familias. En cada familia tenemos un leptón cargado (el electrón, el muón y el tau) y su correspondiente leptón neutro (el neutrino). Además tenemos dos quarks por familia. Estas partículas presentan cargas eléctricas fraccionarias y se combinan para producir hadrones (partículas que interactúan fuertemente). Así el protón está constituido de dos quarks u y un quark d, mientras que el neutrón está formado por dos quarks d y uno de tipo u. La materia ordinaria se forma con los dos quarks de la primera familia y el electrón. El resto de partículas y las formadas por los otros quarks se han detectado en los rayos cósmicos o producido artificialmente en los laboratorios y son inestables. Todas ellas existieron en los primeros momentos de la creación de nuestro Universo en condiciones de muy alta temperatura y energía. Por tanto su estudio nos proporciona información de cómo fueron esos primeros instantes. Actualmente sigue siendo un misterio por qué existen tres familias diferentes de partículas.

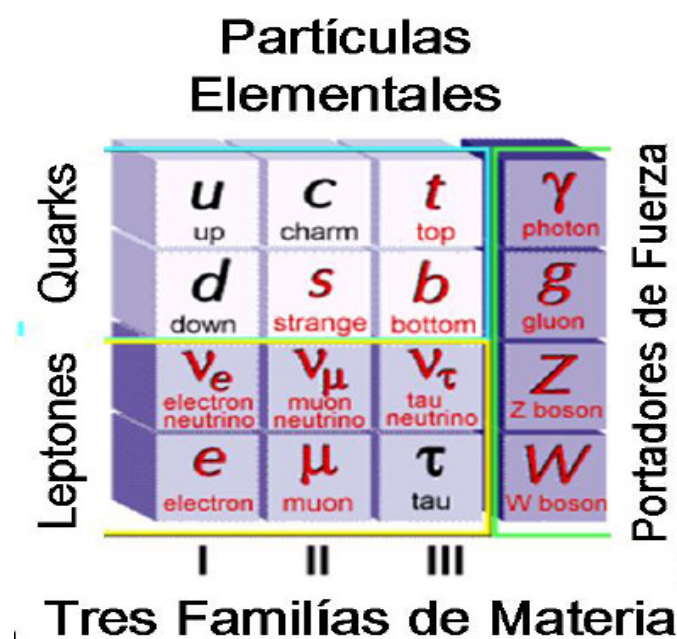


Figura 1.- Las tres familias de partículas fundamentales y los portadores de las fuerzas.

Gracias a una muy exitosa e intensa actividad, tanto teórica como experimental, en colisionadores como LEP (ver Figura 2), SLC, Tevatron, Babar y Belle, hoy en día tenemos un sólido marco teórico, el Modelo Estándar (ME), que explica adecuadamente las interacciones electro-débiles y fuertes. Sin embargo, aún quedan muchas interrogantes abiertas a las que el Modelo Estándar no puede responder. Entre ellas, probablemente la más acuciante sea la del origen de la masa. La generación de masas para las partículas dentro del ME se lleva a cabo a través de lo que conocemos como mecanismo de Higgs. Dicho mecanismo da a lugar a la aparición de la única partícula predicha por el ME que no ha sido observada experimentalmente a día de hoy: el bosón de Higgs.

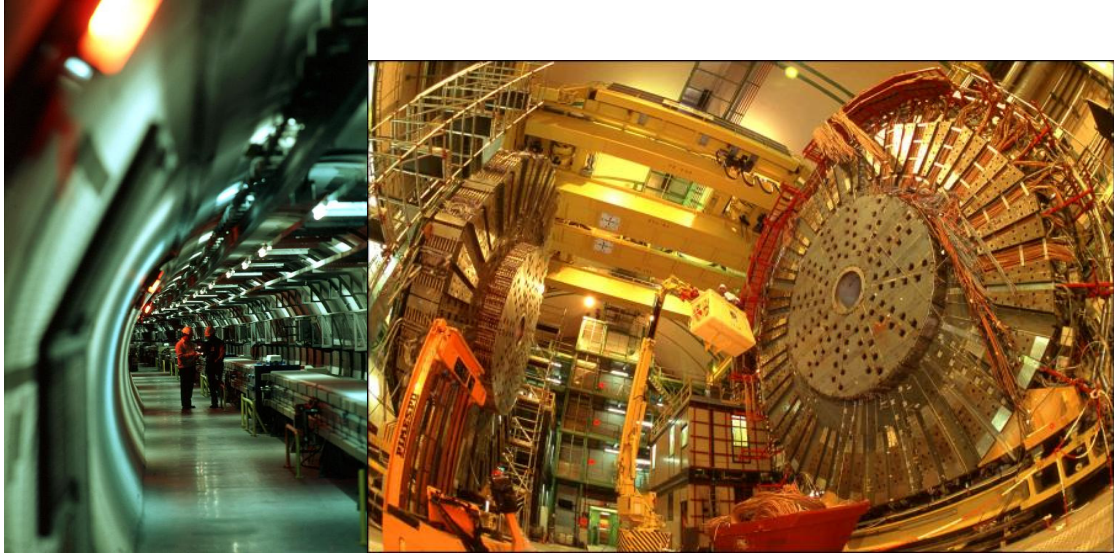


Figura 2.- Izquierda: Imagen del túnel del colisionador electrón positrón conocido como LEP. Derecha: Detector DELPHI; uno de los cuatro detectores de LEP.

Para verificar la existencia del bosón de Higgs y realizar nuevos estudios de Física a escalas de energías nunca antes alcanzadas en un laboratorio, se proyectó y construyó el Gran Colisionador de Hadrones o, según su acrónimo en inglés, el LHC (*Large Hadron Collider*). Éste constituye el acelerador de partículas más potente que existe en el mundo. Cuando esté en operación plena producirá haces de protones o de iones de plomo a una energía de 7 Tera-electronvoltios (un electronvoltio es la energía que adquiere un electrón acelerado mediante una diferencia de potencial de un voltio). La energía de LHC será, por tanto, siete veces superior a la conseguida por cualquier otro acelerador precedente. Estos haces de partículas contenidos merced a campos magnéticos y con velocidades cercanas a las de la luz se cruzarán cada 25 nano-segundos. Su tecnología basada en imanes superconductores le permitirá unas intensidades de haz jamás conseguidas a estas energías, mejorándolas en al menos un factor treinta. Los imanes operarán a una temperatura de $-271\text{ }^{\circ}\text{C}$ constituyéndose en uno de los lugares más fríos de nuestro Universo. Es pues, la culminación de un esfuerzo titánico de alta tecnología concebido a principios de la década de 1980, hace ya unos treinta años. Se ubica en el laboratorio europeo conocido como CERN en Ginebra en un túnel circular de 27 Km de circunferencia, a una profundidad media de unos cien metros y que con anterioridad ya albergó el acelerador LEP durante el periodo 1989-2000 (ver Figura 3). Su inauguración oficial tuvo lugar el 21 de Octubre de 2008. El coste total del acelerador sin incluir su excavación, unos 3000 millones de euros, ha sido financiado por el laboratorio CERN a través de las cuotas de los países miembros de los que España participa con una contribución alrededor del 8%.

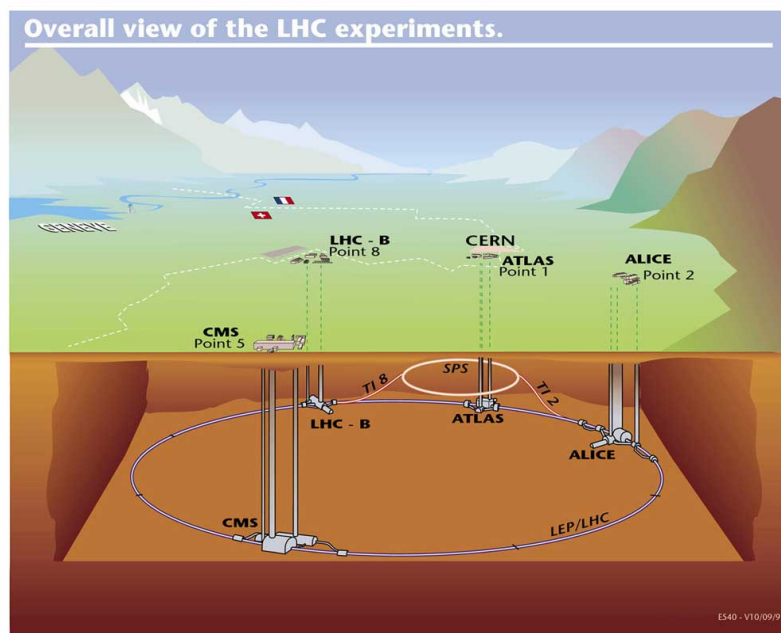
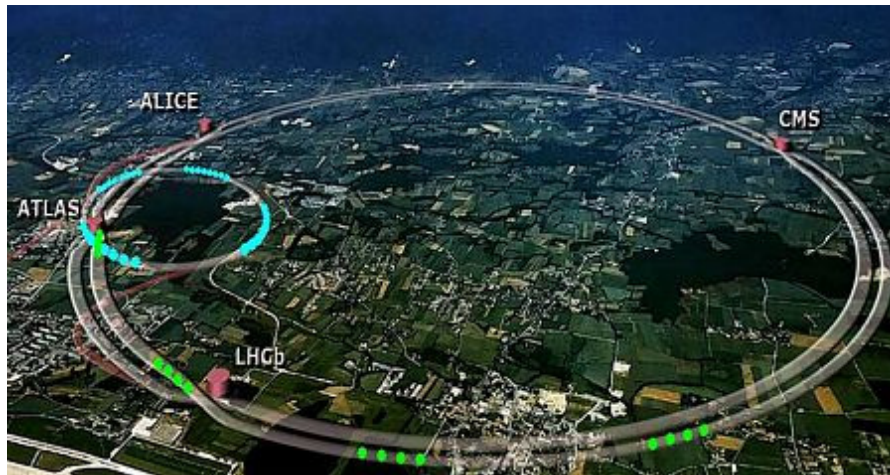


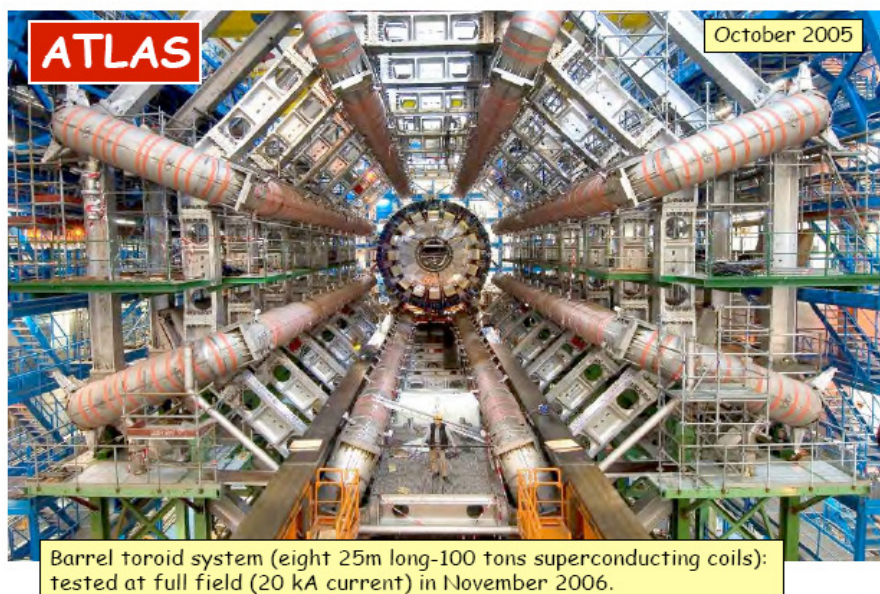
Figura 3.- Arriba: Superposición del anillo de 27 km de circunferencia de LHC sobre la superficie que abarca en la región fronteriza franco-suiza próxima a Ginebra. Abajo: Disposición de los diferentes experimentos de LHC a 100 m bajo la superficie terrestre

Con LHC en funcionamiento nos acercaremos como nunca antes a las condiciones iniciales de la creación del Universo, para con ello poder entender mejor su constitución actual y también su futuro. Su puesta a punto será escalonada hasta alcanzar las prestaciones diseñadas y posiblemente este proceso se desarrolle entre este año y el próximo. Entre los objetivos científicos que se esperan resolver con el LHC destaca, como se indicó, el origen de la masa y con ello el descubrimiento de la esquiva partícula denominada Higgs postulada hace ya 50 años y última pieza por encajar del puzzle del Modelo Estándar. También es muy destacable la explotación que haremos de la física del quark top, el último quark descubierto y cuyas propiedades aún no se han medido. A su vez mejoraremos nuestra comprensión sobre la simetría entre materia y antimateria y su presencia en el Universo. Dónde está, si está, el plasma entre quarks y gluones. La naturaleza de la materia oscura también puede quedar resuelta e incluso podríamos abrir ventanas a la existencia de nuevas teorías, como Supersimetría o dimensiones extra. Y, por supuesto, nunca se puede descartar la aparición de sorpresas que ahora no se pueden prever.

Después de unos tres años de operación a alto rendimiento y hacia el 2011-2012 se esperan obtener resultados concluyentes de las prestaciones científicas de la máquina y

del nuevo universo microscópico que nos pondrá al alcance. Llegados a este punto se definirán las nuevas direcciones y proyectos de investigación en la física de partículas y que ahora ineludiblemente necesitan del veredicto del LHC.

En la trayectoria de los haces se encuentran cuatro grandes detectores encargados de explotar toda la información que la energía e intensidad del LHC pondrá a su disposición (ver Figura 3). En cada uno de ellos habrá colisiones y sus productos se registrarán cada vez que se produzca una interacción. Millones de canales electrónicos desplegarán, en tiempos infinitesimales, su información en perfecta armonía y sincronización con el haz con una frecuencia de 40 millones de Herzios. Cada uno de estos detectores tiene una misión científica característica y su diseño está optimizado para ello. Los detectores ATLAS (ver Figura 4) y CMS son detectores genéricos y están preparados para investigar todo el potencial del LHC, tanto la física que ahora es previsible como la que pudiera surgir y ahora desconocemos. La colaboración LHCb explotará la gran cantidad de partículas producidas con el sabor del quark b. Con ello se profundizará en el estudio de las simetrías entre materia y anti-materia. Finalmente ALICE, optimizado para la operación del LHC con iones de plomo, indagará los puntos de equilibrio de la materia y en especial buscará el plasma de quarks y gluones. Las tecnologías desarrolladas para que los detectores puedan cumplir sus objetivos son frontera de la ciencia con posibles aplicaciones futuras sobre todo en computación y física médica tanto en técnicas de aceleración como de diagnóstico e imagen. El coste de construcción de estos detectores es de unos 300 millones de euros para ATLAS y CMS y sensiblemente inferior para los otros dos. Este valor no incluye el personal ni la gran cantidad de actividades, realizada durante muchos años, ni los prototipos necesarios para conseguir la correcta operación de estos detectores. Por supuesto estas obras de arte y catedrales de la ciencia no tienen valor de mercado, aunque su aportación al conocimiento será incalculable.



6

Figura 4.- Fotografía durante la construcción de ATLAS, uno de los cuatro detectores de LHC en el momento que se instaló su imán superconductor.

El aprovechamiento de los datos suministrados por los detectores se lleva a cabo mediante colaboraciones internacionales que incluyen, no sólo a la mayoría de países europeos, miembros o no del CERN, sino también de otras regiones del mundo tales como África, América, Asia y Australia. España colabora en los cuatro experimentos del LHC.



Figura 5.- Participación Española en los experimentos del Large Hadron Collider.

En ATLAS, España participa (ver Figura 5) a través de los grupos del Institut de Física d'Altes Energies (IFAE) y el Institut de Microelectrónica (CNM-IMB) de Barcelona, el Instituto de Física Corpuscular de Valencia (IFIC) y la Universidad Autónoma de Madrid (UAM). Sus contribuciones son al calorímetro hadrónico, TiCal (IFAE e IFIC), al detector de trazas de silicio, SCT, (CNM-IMB e IFIC) y al calorímetro electromagnético (UAM). La contribución total representa el 2,1% del detector y en personal el 3,4% (unas 85 personas contando investigadores, estudiantes de doctorado e ingenieros y personal técnico).

En CMS, los grupos españoles (ver Figura 5) son el Centro de Investigaciones Energéticas, medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), la Universidad Autónoma de Madrid (UAM), el Instituto de Física de Cantabria (IFCA) y la Universidad de Oviedo (UO). Estos grupos mayoritariamente contribuyen al sistema de cámaras de muones (CIEMAT), *trigger* (UAM) y alineamiento (IFCA y UO). En total representan el 1,5% del detector y el 2,5% en personal (unas 50 personas).

España en LHCb (ver Figura 5) viene representada por los grupos de la Universidad de Barcelona (UB), la Universidad Ramon Llull (URL) también de Barcelona y la de Santiago de Compostela (USC-IGFAE). Han contribuido a construir el detector de centelleo, SPD (UB y URL) y el detector central de silicio (USC-IGFAE) con una participación del 2,7% del total del detector y un 4,8% en personal equivalente a unas 33 personas.

En ALICE los grupos implicados son el CIEMAT y el USC-IGFAE (ver Figura 5), con una pequeña contribución en términos de computación y que representa un porcentaje algo menor al 1% tanto en participación en la construcción del detector como en personal.

Además España también contribuye de manera significativa en el proyecto GRID con una aportación notablemente alta para nuestro nivel. El proyecto GRID se ha desarrollado para

dar una solución viable al tratamiento de datos dada la alta tasa de producción del LHC. Es una tecnología innovadora que permite utilizar de forma coordinada todo tipo de recursos (entre ellos computación, almacenamiento y aplicaciones específicas) que no están sujetos a un control centralizado. Es una nueva forma de computación distribuida, en la cual los recursos pueden ser heterogéneos (diferentes arquitecturas, supercomputadores, clusters, etc..) y se encuentran conectados mediante redes de área extensa vía Internet. Puesto que la colaboración entre instituciones envuelve un intercambio de datos, o de tiempo de computación, el propósito del GRID es facilitar la integración de recursos computacionales. El símil más conocido sería el sistema de la red eléctrica (GRID eléctrico) generada en multitud de lugares y mediante técnicas diversas que son transparentes para su uso en nuestros hogares e industrias. Es obvio que esta tecnología innovadora puede suponer en un futuro próximo una gran revolución para el uso y optimización de recursos computacionales.

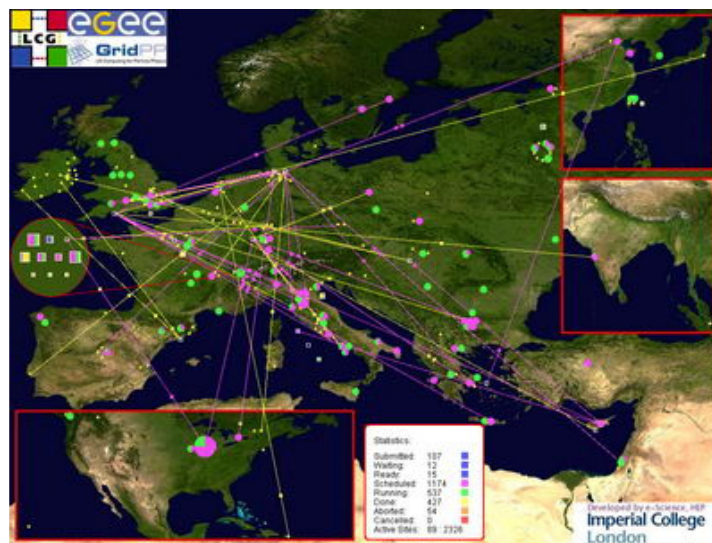


Figura 6.- Estructura de interconexión entre centros que participan en el proyecto GRID para LHC.

La estructura jerárquica del GRID (ver Figura 6) para el LHC es una tela de araña cuyo nodo central o Tier-0 está ubicado en el CERN (Ginebra). Conectados con él hay once centros Tier-1 distribuidos por el resto del mundo, siendo el Port d'Informacio de Catalunya (PIC) en Barcelona uno de ellos. Para la siguiente capa, España cuenta con un Tier-2 por detector que en nuestro caso está federado y con participación directa de cada uno de los grupos participantes. Finalmente la capa denominada Tier-3 organiza el análisis de datos local en cada grupo.

En general y pese a que España no es un país con gran tradición científica cabe destacar que la producción y nivel internacional de la física de partículas española son altos. Según la fuente del grupo SCOAP³ y teniendo en cuenta no solo el número de publicaciones sino también el número de firmantes, España es responsable del 3,1% del total de resultados relevantes del campo y ocupa el lugar noveno en el ranking mundial. En el futuro, pues, es de esperar que dadas las contribuciones actuales al LHC la situación pueda incluso mejorar.

Para saber más:

- [1] Particle Data Group, <http://pdg.lbl.gov/>
- [2] Particle Physics News and Resources, <http://www.interactions.org/>
- [3] El acelerador LHC, <http://public.web.cern.ch/public/en/LHC/LHC-en.html>
- [4] La aventura de las partículas, <http://particleadventure.org/>

[5] Programa Nacional de Física de Partículas, <http://www.fpa.csic.es/>