

# EL ACELERADOR LHC DEL CERN: Parte II

THE LHC ACCELERATOR IN CERN

**Carmelo Mendivil Arrieta**  
Ingeniero Industrial  
Colegio de Ingenieros  
Industriales de Bizkaia  
**Rafael Iturbe Uriarte**  
Ingeniero Industrial. ANTEC

Recibido: 27/11/06

Aceptado: 29/01/07

## RESUMEN

La creación de nuevas partículas constituyentes de la materia se logra con la colisión de otras partículas aceleradas a grandes energías: cuanto mayor es la energía, más se profundiza en el conocimiento. El nuevo acelerador LHC del CERN, con la mayor energía hasta la fecha, permitirá descubrir horizontes más amplios.

**Palabras clave:** Partículas, aceleración, colisión, energía, imanes, superconductividad.

## ABSTRACT

*The creation of new particles constituent of the matter is obtained in the collision of other particles accelerated to great energies: greater the energy, deeper is the knowledge. The new LHC accelerator of CERN, with the greater energy ever employed, will let to discover further horizons.*

**Key words:** Particles, acceleration, collision, energy, magnets, superconductivity.

## INTRODUCCIÓN

En el momento de la publicación en DYNA de este artículo se están terminando de instalar en el CERN los últimos imanes superconductores del LHC (*Large Hadron \* Collider*), el medio más poderoso jamás construido para profundizar en el conocimiento de las propiedades fundamentales de la materia y sus leyes, que son la ba-

se de ciencias como la Física, Química, Biología y Medicina. Estas leyes permiten también explicar los fenómenos producidos en los primeros instantes del nacimiento del Universo, y en las colisiones de los aceleradores se recrean, a escala infinitamente más reducida, las mismas condiciones que en el *Big Bang*,

La instalación completa de los complejísimos componentes de este acelerador está prevista para la primavera de 2007, realizar unas primeras colisiones de baja energía en el otoño y obtener resultados con el funcionamiento a plena carga en la primavera de 2008.

## ANTECEDENTES

A lo largo del primer tercio del siglo XX, los científicos habían revolucionado la Física con el desarrollo de teorías e investigaciones que permitían profundizar en el conocimiento de la materia: la Relatividad de Einstein y la Mecánica Cuántica pusieron las bases para conocer la constitución del átomo: un núcleo central masivo, formado por protones con carga eléctrica positiva y neutrones sin carga, rodeado de los electrones con carga eléctrica negativa girando en diversas órbitas a su alrededor. Se conocían y se habían medido muchas de las características de estos constituyentes del átomo, como su masa, carga eléctrica, dimensiones, etc. Pero este modelo del átomo presentaba un gran problema: de acuerdo con las leyes del electromagnetismo los protones del núcleo con su carga eléctrica positiva estaban afectados por una fuerza de repulsión que tenía que dar lugar a que se separasen unos de otros, y que no podía ser contrarrestada por los neutrones sin carga. Sin embargo, el núcleo era muy compacto, sólido y difícil de romper: tenía que haber una fuerza intensa que

mantuviera unidos protones y neutrones, una fuerza superior a la electromagnética.

Werner Heisenberg (Fig. 1) propuso que la unión protón-neutrón se



Figura 1: W.Heisenberg, uno de los grandes creadores de la Mecánica Cuántica con su Principio de Incertidumbre.

producía por el intercambio mutuo de un electrón, pero la fuerza electromagnética de repulsión que sentían los protones era intensa, dada la pequeña distancia dentro del núcleo, por lo que el electrón no tenía masa suficiente para ser portador de la fuerza, superior a la electromagnética y desconocida hasta entonces, que mantenía unidos protones y neutrones. El japonés Hideki Yukawa sugirió en 1935 que esa fuerza, que se llamó más tarde "interacción nuclear fuerte", era producida por el intercambio de una partícula más pesada que el electrón (aunque menos que el protón) que llamó "mesón" (intermedia): esta partícula, llamada más tarde mesón pi o pion, fue descubierta en 1947 en los rayos cósmicos, con

\* Ver Glosario y Cuadro del Modelo Estándar en la Primera Parte del artículo en DYNA, Jul.-Set. 2005



una masa unas 200 veces la del electrón. Pero, al mismo tiempo, apareció un grupo inesperado de partículas cuya existencia planteó una serie de nuevos problemas: se entró en una nueva Física, pasando de la Física Nuclear a la Física de las Partículas.

### LAS ALTAS ENERGÍAS: RECREAR LA CREACIÓN

Las partículas de este tipo, a pesar de su diversidad, presentan todas unas características comunes: tienen una vida limitada y son *inestables*. Las partículas que forman el átomo y que constituyen la materia, (protón, neutrón y electrón), son estables, pero las otras se degradan espontáneamente, decaen transformándose en otro tipo de partículas. Y así como las partículas estables forman parte de la Naturaleza y están disponibles para ser ensayadas e investigadas, las inestables no existen en el mundo de modo natural; hay que *CREARLAS* y aprovechar su breve existencia para conocerlas y estudiarlas partiendo de otras de masa superior o, lo que es lo mismo, de mayor energía (recordar  $E=mc^2$ ): y el medio de obtener partículas de gran energía son los aceleradores. Como referencia, el *pion* (ya citado) tiene una masa equivalente a 140 MeV y se presenta en versión de carga eléctrica y sin carga: con carga tiene una vida corta de 26 nanosegundos ( $26 \times 10^{-9}$  s) y sin carga vida aún menor ( $10^{-16}$  s).

En la Física de las Partículas la energía se mide en electronvoltios (eV), la energía adquirida por un electrón (cuya carga en el sistema S.I. equivale a  $10^{-19}$  culombios) con el potencial de un voltio (un eV equivale a  $10^{-19}$  julios). Para dar una idea de la escala, los átomos pueden ser penetrados (sus electrones arrancados) con el impacto de partículas aceleradas a la energía de unos pocos eV: ésta es la energía que actúa en las reacciones químicas (combustión, electrolisis, etc.). Para penetrar en el núcleo, sin embargo, es necesario impactarlo con partículas aceleradas a energías de millones de electronvoltios, megaelectronvoltios (MeV): éstas son las energías que se presentan en las reacciones nucleares, como en

los reactores nucleares o el sol. Para ir más adelante en la penetración de la materia, dentro del protón o el neutrón en el núcleo, hay que impactarlos con partículas aceleradas a energías de miles de millones de eV, gigaelectronvoltios (GeV), e incluso más: el LHC está diseñado para producir energías de decenas de teraelectronvoltios ( $\text{TeV} = 10^{12}$  eV). Esta es la razón por la que la Física de las Partículas es conocida también como Física de las Altas Energías.

Como recopilación de lo expuesto, puede afirmarse que, cuanto más pequeña es la estructura de la materia que se desea conocer, es necesaria más energía. A cada nivel corresponde una densidad de energía: cuanto más simple es una estructura, más se resiste a ser conocida.

### LOS PRIMEROS PASOS

En las primeras investigaciones en este campo de la Física, **Ernest Rutherford** (Fig. 2) partió de las radiaciones emitidas por los elementos ra-

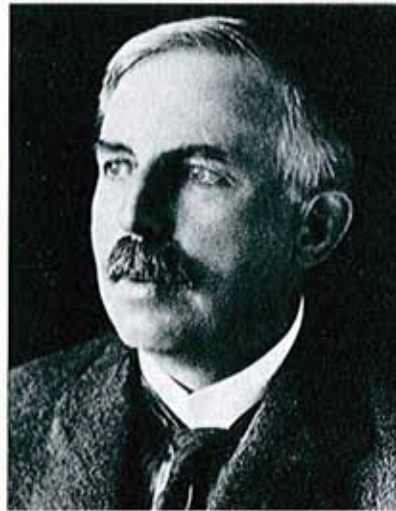


Figura 2: E. Rutherford, genial impulsor de la Física experimental

diactivos naturales, partículas *alfa* (núcleo de helio, por tanto con carga eléctrica positiva) y partículas *beta* (electrón, de carga negativa), ambas afectadas, a causa de su carga, por los campos eléctricos y magnéticos. La radiación natural es de energía muy débil por lo que en estos primeros ensayos las partículas eran aceleradas mediante campos eléctricos para comunicarles una energía muy

superior a la que tenían en reposo, campos cuyo potencial sobrepasó el valor de tres millones de voltios, potencial obtenido por el efecto multiplicador de una serie de rectificadores y condensadores en cascada.

Una fuente natural e insospechada de partículas de vida efímera fueron los rayos cósmicos, partículas de alta energía obtenida al ser aceleradas por los intensos campos electromagnéticos interestelares. Son un medio importante de investigación, en el que se han descubierto partículas (que fueron confirmadas posteriormente en laboratorio cuando se fueron construyendo aceleradores de mayor energía), pero de carácter aleatorio y difícil de controlar para estudiarlas con precisión.

El potencial posible en un campo electrostático está limitado por las pérdidas por radiación y de conducción de los soportes aislantes de las esferas metálicas huecas a las que se les aplicaba la carga, y no proporcionaban a las partículas energía suficiente para continuar profundizando en la investigación. La solución vino del físico noruego **Rolf Wideroe** en 1928 con la aplicación a las partículas de repetidos impulsos de aceleración de potencial eléctrico relativamente bajo: una serie de tubos de longitud progresivamente mayor a los que se aplica el potencial alternativamente de signo contrario. Una partícula con carga eléctrica que se introduce en el primer tubo lo recorre a velocidad constante, pero recibe un impulso de aceleración en el entrehierro con el segundo tubo al ser atraída por un campo de signo contrario, atravesando el segundo tubo a mayor velocidad: y así en los siguientes tubos que han de ser sucesivamente más largos ya que, al aumentar en cada uno de ellos la velocidad con impulsos eléctricos de igual duración, recorren mayor espacio. Esto es el acelerador lineal o *linac* (*linear accelerator*), un impulsor que sigue siendo uno de los componentes básicos de los actuales aceleradores.

Como para obtener mayores energías era necesario construir *linacs* de dimensiones desproporcionadas a los laboratorios de la época (en la **Uni-**



versidad de Stanford se construyó uno de 66 m de longitud alimentado a frecuencia de 3.000 MHz con una energía de 600 MeV), **Ernest O. Lawrence** en Berkeley transformó el recorrido lineal del *linac* en uno circular, el *cyclotron*, obteniendo un aparato compacto, de reducidas dimensiones: una caja circular partida en dos mitades separadas y eléctricamente aisladas por una ranura diametral, que se conectan a un oscilador de alta frecuencia y en cuyo centro se encuentra la fuente de partículas: todo encerrado en un recipiente estanco lleno del gas a baja presión del que se desea obtener las partículas (iones), y situado en el entrehierro de los polos de un potente electroimán. Las partículas emitidas en el centro son desviadas por el campo magnético del imán con una trayectoria circular: cada vez que atraviesan la ranura entre las dos mitades son aceleradas por el campo eléctrico de signo opuesto de la siguiente mitad, aumentando su velocidad y describiendo así circunferencias de mayor diámetro, obteniendo una trayectoria espiral hasta salir de la caja en línea recta hacia el equipo de detección.

La tensión de alta frecuencia de alimentación no puede aumentarse indefinidamente para obtener mayor energía, pues la partícula da menos vueltas y acaba saliendo por la periferia con la misma energía. Ésta depende del tamaño de las medias cajas y de la intensidad del campo magnético, pero su aumento tiene un límite, pues cuando las partículas se acercan a la velocidad de la luz, los efectos de la relatividad hacen que las partículas se retrasen con los impulsos de alta frecuencia de aceleración, haciendo el funcionamiento inestable. El *cyclotron* desempeñó un papel fundamental en la investigación de la Física y dio paso a una versión modificada, el *sincrotrón*, que, con mejoras sucesivas, es la síntesis de los actuales aceleradores.

**Edwin McMillan**, colega de Lawrence, tuvo la intuición de independizar el campo eléctrico de aceleración del magnético de orientación del haz de partículas, (pues en el *cyclotron* todo el sistema está bajo el campo del

imán), sincronizando al mismo tiempo los impulsos de aceleración con las variaciones de masa de las partículas con la velocidad, de modo que se regulan automáticamente. El electroimán del *cyclotron* se sustituye por otros más pequeños colocados en un anillo circular para la órbita de las partículas en vez de espiral. En la versión más actualizada, el *sincrotrón* está formado por cuatro tramos rectos, dos de los cuales contienen los puntos de inyección y extracción de las partículas y los otros dos los elementos de aceleración, unidos por cuatro arcos de circunferencia con los imanes de guiado del haz.

**EL ACELERADOR**

El acelerador es la máquina capaz de impartir velocidad y energía extraordinarias a las partículas con carga eléctrica. Está basado en el tubo de rayos catódicos con el que **J. J. Thomson** descubrió el electrón hace 110 años, y que se encuentra sintetizado en un tubo de televisión: consta, de manera resumida, de un tubo de vidrio en el que se ha hecho el vacío, y que contiene los componentes siguientes (Fig. 3):

- Un campo magnético de focalización, que concentra en un haz las partículas dispersas emitidas.
- Un campo eléctrico, que acelera el haz de partículas.
- Otro campo magnético, que desvía el haz para recorrer toda la pantalla del televisor.
- Recepción del haz: la pantalla fluorescente del televisor recibe el impacto del haz, que se transforma en una señal luminosa.

En los aceleradores con muy alta energía las partículas alcanzan prácticamente la velocidad de la luz (que no pueden sobrepasar), y esa velocidad es la que les comunica su energía, que por la Relatividad equivale a su masa, y viceversa: según la energía que se comunica a la partícula resulta la velocidad que alcanza. Un electrón con energía de 1 MeV adquiere una masa que es tres veces la de reposo; con 100 MeV su masa es 200 veces la de reposo y tiene una velocidad 4 km/s inferior a la de la luz; con 50 GeV la velocidad es prácticamente la de la luz (teniendo en cuenta que se desplaza en el vacío, su velocidad es incluso superior a la de la luz en el aire), y su masa se multiplica cientos

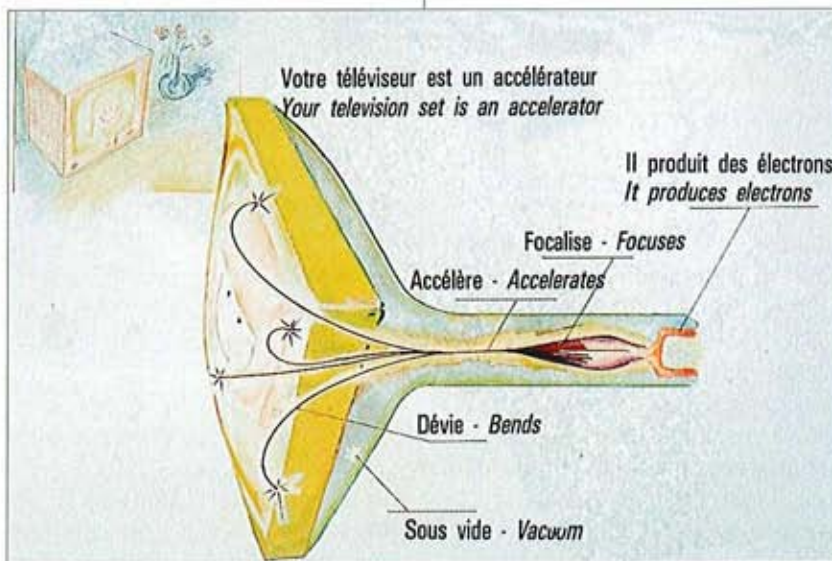


Figura 3: El tubo de televisión contiene los elementos básicos del acelerador

• Una fuente de partículas, que en el televisor es un filamento incandescente, calentado con corriente eléctrica, que emite electrones.

de miles de veces: una comparación típica es decir que a esa velocidad un ratón, sin cambiar de tamaño, tendría el peso de un elefante.



Producir partículas de varios tipos para diferentes experimentos, concentrarlas en haces compactos con campos magnéticos de focalización, acelerarlos a velocidades límite con campos eléctricos de alta frecuencia en cavidades resonantes, hacer circular los haces de partículas en un vacío perfecto, guiarlos en órbita circular en campos magnéticos muy precisos para enfrentarlos en la colisión, detectar y registrar los fenómenos resultantes de la colisión, rapidez de transmisión y capacidad de análisis de la ingente información recibida....

En resumen, el método actual del estudio de la materia y sus leyes, la Física de las Altas Energías, es el mismo que utilizó **Rutherford** hace 100 años: producir partículas, hacerlas chocar, registrar los resultados y analizarlos.

### EL CERN

Tras la II Guerra Mundial, comenzaron los contactos entre personalidades europeas de ámbitos muy diversos con el objetivo de restañar heridas y sentar las bases de proyectos comunitarios. En una reunión de la *Conferencia Cultural Europea*, en diciembre de 1949 en Lausana, se presentó la propuesta de la constitución de un laboratorio europeo de Física basado en la idea lanzada por el eminente científico francés **Louis de Broglie**, el padre de la Mecánica Ondulatoria: *"no sólo en los términos políticos y económicos estos movimientos en favor de la unidad europea son deseables e incluso necesarios: son también válidos con relación a las actividades intelectuales y, en particular, científicas"*.

En los tres años siguientes, importantes figuras europeas trabajaron en la plasmación de la idea y en julio de 1953 se firmó en París el acuerdo para la constitución del **CERN** (*Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*) con el objetivo de la *"investigación pura y fundamentalmente científica"*. En el interin se había estudiado el lugar del emplazamiento de todo el complejo, que, debido al apoyo entusiasta de la Confederación Helvética, fue finalmente ubicado en

Meyrin, próximo a Ginebra, en el corazón de Europa.

El objetivo fundamental es aunar los esfuerzos de todos los países participantes para crear un laboratorio de una envergadura tal que no pudiera ser abordado individualmente. Se concretó en las siguientes tareas:

- Asegurar la construcción y funcionamiento de los aceleradores y el equipo auxiliar necesario.
- Definir el programa de actividades.

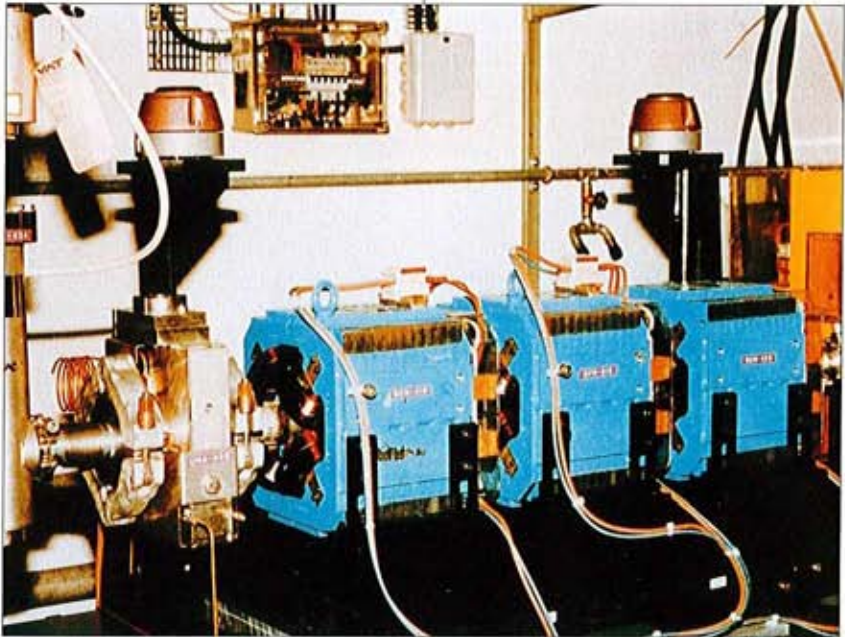


Figura 4: Cuadropolos en la línea de transferencia del proyecto ISOLDE-PS-BOOSTER del CERN

- Organizar la cooperación internacional con los laboratorios de los Estados miembros.

Realizar estas tareas exige una organización muy compleja con miles de físicos teóricos y experimentales, científicos e ingenieros en tecnologías electrónica, mecánica, materiales, etc. para diseñar y colaborar con la industria europea en la fabricación de los aceleradores. El **Consejo de Gobierno** define los programas de investigación junto con el **Comité de Política Científica**, que está compuesto de hombres de ciencia eminentes que no tienen que proceder necesariamente de los Estados miembros. Un Organismo anexo independiente es el **ECFA** (Comité Europeo para Futuros Aceleradores), que representa a la comunidad euro-

pea de la Física de las Partículas, para los objetivos a largo plazo.

Después de un análisis intensivo de los posibles programas de investigación, el Comité decidió acometer la fabricación de dos aceleradores: el SC (*Synchrotron-Cyclotron*) y el PS (*Proton-Synchrotron*). El primero fue una pequeña máquina, en servicio en 1957, de 5 metros de diámetro del anillo de imanes y 0,6 GeV de energía, un acelerador para protones y núcleos: reconstruido posterior-

mente como separador de isótopos (Fig. 4).

El PS es la primera gran máquina del **CERN** y en su día el acelerador de partículas más grande en el mundo: 200 metros de diámetro y 28 GeV de energía. Diseñado para acelerar protones, que son producidos partiendo de átomos de hidrógeno a los que se les extraen los electrones, y son luego introducidos en el anillo circular de imanes por dos inyectores lineales, con la energía del haz incrementada a 1 GeV por un amplificador (*booster*) de 50 metros de diámetro. Desde su puesta en servicio en 1959, en el PS se han hecho cientos de experimentos con descubrimientos importantes, y se ha utilizado como preacelerador en máquinas mayores posteriores y lo será en el futuro LHC.



**SUPER PROTON SYNCHROTRON (SPS)**

Esta máquina, prevista para acelerar protones hasta energías de 450 GeV, es de unas dimensiones tales (anillo de imanes de 2,2 km de diámetro) que aconsejaron su construcción en un túnel subterráneo que atraviesa la frontera franco-suiza a una profundidad entre 23 y 65 metros. Está en servicio desde 1976.

La teoría de la unificación de la fuerza nuclear débil y la electromagnética (*la interacción electrodébil*) preveía la existencia de unas partículas con gran masa portadoras de la fuerza, los *bosones*  $W^+$ ,  $W^-$  y  $Z^0$ , con masa unas 100 veces la del protón, que hacían necesaria gran energía para ser descubiertas en los aceleradores. En el SPS se vieron indicios de esas partículas de vida tan efímera, pero sin llegar a confirmarlas, porque en el detector de blanco fijo no se aprovecha toda la energía del haz: las partículas *rebotan* o se diluyen, según el tipo de detector.

El **Comité para Futuros Aceleradores** (ECFA) preparó en 1963 un informe con los programas para los próximos 15 años, y entre ellos recomendó la construcción de un *colisionador*, un acelerador en el que dos haces de partículas chocan de frente (en vez de hacerlo con un blanco fijo) aprovechando así toda la energía de las partículas. En 1971 entró en servicio el **ISR** (*Intersecting Storage Ring*), formado por dos anillos de imanes de guiado de los haces de partículas, (que se entrecruzan ocho veces), de 300 metros de diámetro, y energía en el centro de la masa de 63 GeV: las colisiones se producen en dos de los ocho puntos de intersección. El ISR rozó la perfección técnica: antes de él se desconocía si los haces de protones se podían conservar girando en los anillos por largos periodos de tiempo para poder realizar colisiones repetidas. Los excelentes resultados marcaron la pauta para el diseño de los futuros colisionadores.

El **Consejo de Gobierno del CERN** aprobó la propuesta del físico italiano **Carlo Rubbia**, de reconvertir el SPS en colisionador, lo que pre-

sentaba nuevos problemas: al estar formado el acelerador por un solo anillo de imanes, por ellos tienen que circular a la vez en sentido contrario haces de partículas que han de ser de carga opuesta, es decir partículas y sus antipartículas, protones y antiprotones: un mismo campo eléctrico los acelera en sentidos opuestos. Si bien la producción de protones no presenta dificultades, no sucede lo mismo con los antiprotones en cantidad idónea para los experimentos: bombardeando un blanco con protones se tienen los antiprotones, pero de manera desordenada para poder ser utilizados.

El físico holandés **Simon van der Meer** inventó un procedimiento, conocido como *enfriamiento estocástico*, por el que se ordenan los antiprotones en un anillo acumulador (AA), completado después por un colector (AAC) junto al PS, en el que se producen antiprotones de energía 26 GeV y en el que son almacenados y enfriados durante días.

Con el SPS reconvertido en colisionador en 1981, con energía en el centro de la masa de 630 GeV, (315 por haz), se descubrieron en 1983 las partículas  $W^+$ ,  $W^-$  y  $Z^0$  que explican la unificación de la fuerza nuclear débil con la electromagnética, un hito crucial en la historia de la Física: la importancia del descubrimiento viene avalada por la concesión conjunta a **Rubbia** y **Van der Meer** del Premio Nobel de Física tan sólo un año más tarde, en 1984.

En la actualidad se producen antiprotones en el **CERN** en cantidades importantes, unos  $10^{12}$  al día, que tienen muchas aplicaciones: un ejemplo es el **LEAR** (*Low Energy Antiproton Ring*), un anillo de 25 metros de diámetro en el que se rebaja la energía hasta 0,1 GeV para estudiar la antimateria en condiciones de baja energía.

**LEP ( LARGE ELECTRON-POSITRON COLLIDER )**

En 1975, antes de que el SPS entrara en servicio, el ya citado **ECFA** había estudiado dos propuestas para la siguiente máquina del CERN: un acelerador lineal y otro circular. El colisionador

lineal es más simple y, por tanto, más económico, tanto en su construcción como explotación, pero tiene el inconveniente de que las partículas se enfrentan una sola vez, colisionen o no, y luego se pierden. En el circular, las partículas dan muchas vueltas, son aceleradas repetidamente y pueden enfrentarse varias veces hasta tener resultados interesantes. Por estas razones propuso la construcción de un anillo colisionador de *leptones*.

Los colisionadores de protones, como el SPS, tienen mucha energía, pero en la colisión se originan fenómenos complicados, difíciles de analizar, al ser producto de partículas compuestas, formadas de *quarks* y los *gluones* que intervienen en la interacción nuclear fuerte. Los electrones y sus antipartículas, los positrones, sin embargo, son simples, objetos "puntuales", susceptibles de ser convertidos totalmente en energía, pero dada su masa ligera son difíciles de llevarlos a altas energías. En su órbita circular una parte importante de la energía que reciben para acelerar la pierden emitiendo ondas, lo que se conoce como "*radiación sincrotrón*", de gran interés en muchas aplicaciones, pero que hace difícil el acelerarlos. Esta radiación se produce en trayectoria circular y es más fuerte cuanto más "cerrada" sea la curva, menor es su radio de curvatura: recíprocamente, a menor curvatura (mayor longitud de la circunferencia) la radiación es menor, y desaparece prácticamente en una trayectoria recta. El tamaño del colisionador fue el compromiso entre el costo de construcción y los costos de explotación (el consumo de energía): con una longitud de 27 kilómetros, el LEP fue aprobado en 1981 y construido entre 1983 y 1989.

Lo mismo que el SPS, el LEP está construido en un túnel, en un plano ligeramente inclinado (1,4%) con la horizontal, profundidad con la superficie entre 50 y 170 m, cuatro enormes cavernas de 23 m de diámetro y 70 de longitud para alojar los gigantescos equipos de detección. Son cifras abrumadoras pero que reflejan la complejidad de esta



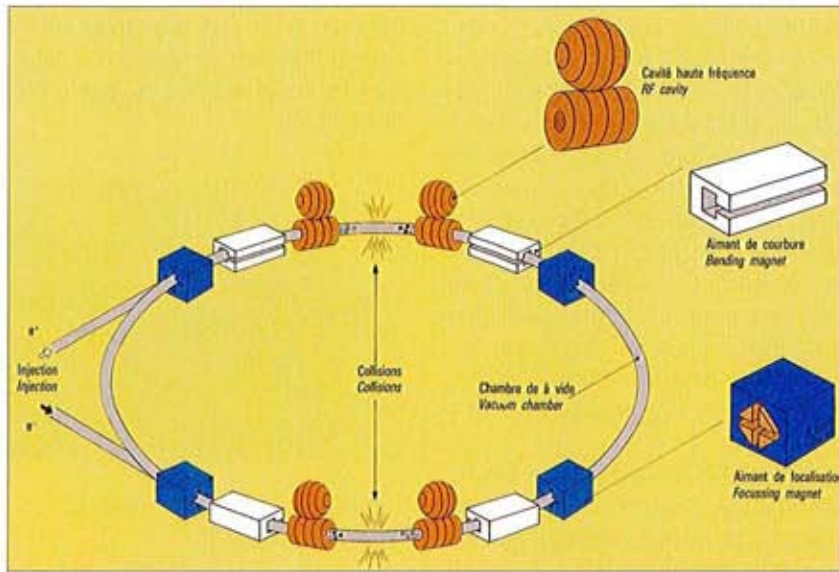


Figura 5: En el LEP la Aceleración es con las cavidades de alta frecuencia, la Deflexión con los imanes de curvado (dipolos), la Focalización con los imanes cuadrupolos, el Vacío en el tubo de 27 km ...

máquina, que no es perfectamente circular sino que consta de ocho arcos de circunferencia de 2.800 m, unidos por ocho tramos rectos de más de 500 metros.

La figura 5 representa de manera esquemática los diferentes componentes que forman el LEP. Los más importantes se describen brevemente a continuación.

**Inyectores**

El sistema de inyección de las partículas está diseñado para producir 5 billones ( $5 \times 10^{12}$ ) de electrones y positrones que son introducidos en el anillo del LEP cada 12 minutos.

Los electrones son obtenidos de manera simple con un filamento calentado al rojo vivo como el de una lámpara incandescente, y son extraídos del filamento por campos eléctricos. Producir positrones es una operación más laboriosa: un haz de electrones es introducido en un acelerador lineal (*linac*), donde alcanza energía de 200 MeV, y es proyectado luego contra un blanco fijo: con esa energía es posible extraer positrones del blanco por intercambiabilidad entre masa y energía. Un campo eléctrico conduce sólo los positrones a otro *linac* donde adquieren una energía de 600 MeV.

Los positrones son almacenados en un anillo EPA (*Electron-Positron*

*Accumulator*) dando vueltas hasta que hay cantidad suficiente para pasar sucesivamente a los preaceleradores PS (energía 3,5 GeV) y SPS (22 GeV), pasando finalmente al LEP (Fig. 6).

**Aceleración**

Los sistemas de aceleración son uno de los componentes fundamentales de estas instalaciones, con el fin de seguir aportando los empujones de energía en cada vuelta a los haces de partículas y reponer así la energía que pierden por la radiación sincro-

trón: y dentro de los 27 km del anillo, las cavidades ocupan casi un kilómetro y son el principal elemento de aceleración.

Desde los años en que se pasó de una aceleración por campos electrostáticos a los aceleradores electrodinámicos, con el *linac* y el ciclotrón, estos dispositivos han tenido un desarrollo tecnológico extraordinario y, si bien los aceleradores de partículas han contribuido de manera sustancial a esa evolución, han encontrado también una gran variedad de aplicaciones en las comunicaciones eléctricas.

En su forma básica, este dispositivo es un circuito resonante L-C, representado de manera esquemática en la figura 7 por una bobina y un condensador. Físicamente es una caja cilíndrica, siendo las dos bases del cilindro, con agujero central, las dos placas capacitivas y la superficie lateral, la parte inductiva. En un circuito resonante ideal, con el interior de la caja perfectamente dieléctrico (aislante), y todas las paredes perfectamente conductoras (sin resistencia), constituye un resonador cerrado, con toda la radiación hacia el interior, sin ninguna pérdida al exterior: una onda puede viajar indefinidamente dentro de esta cavidad ideal reflejándose en las paredes sin sufrir pérdidas; el campo eléctrico es longitudinal, y así las partículas que penetran por el orificio central de una de las bases reci-

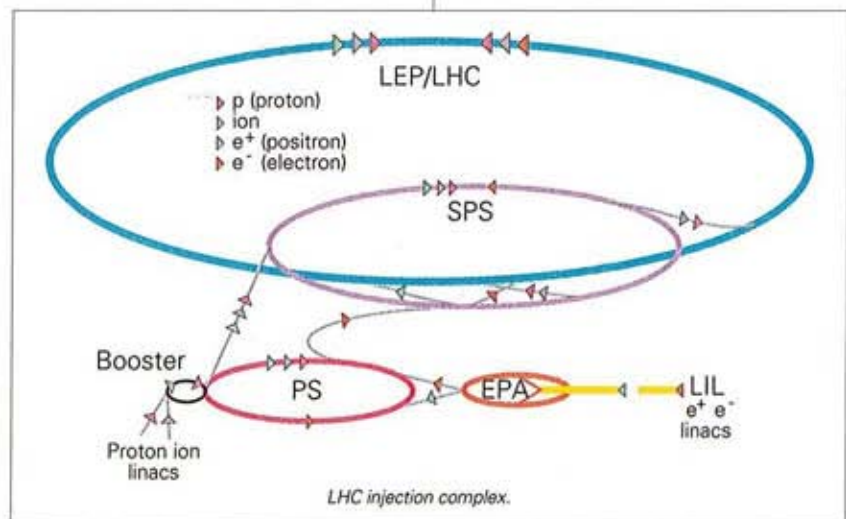


Figura 6: Esquema del sistema acelerador de partículas del CERN: colisiones de electrón-positrón en el LEP y de protones o iones en LHC, con los PS y SPS como preaceleradores.



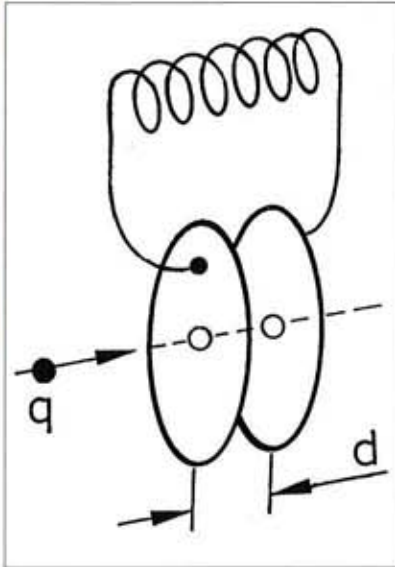


Figura 7: El circuito acoplado paralelo autoinducción-capacidad (L-C) representa de manera esquemática a la cavidad resonante de aceleración  $\omega_p^2 = 1/LC$

ben toda la energía de la radiación para impulsirlas.

En la cavidad real, las paredes construidas en cobre de alta conductividad son recorridas circularmente por el campo magnético de manera tangencial, sin componente radial, y, dada la alta frecuencia, con una profundidad de penetración de un espesor mínimo (de micras), por tanto con una fuerte resistencia superficial que, por efecto **Joule**, da unas pérdi-

das de potencia importantes, un calentamiento que limita la potencia suministrada a la cavidad. Para optimizar las prestaciones, las cavidades tienen forma toroidal con una sección elíptica, acoplando varias en cascada (Fig. 8). La geometría y las dimensiones dependen fundamentalmente de la frecuencia de oscilación, que, a su vez, es función del tipo de partículas a acelerar: con iones pesados la frecuencia es de 50 a 150 MHz, mientras que con leptones es de 350 a 3.000 MHz.

En el LEP las cavidades están repartidas en dos puntos situados en los tramos rectos y diametralmente opuestos, con un total de 128 cavidades de cinco celdas. Cada una de ellas está provista de una esfera hueca que acumula la energía de alta frecuencia entre el paso de los paquetes de partículas, con un ahorro de energía del 40%. La energía de alta frecuencia (352 MHz) es producida por 16 *klystrones* de 1100 kW cada uno, que es comunicada a las cavidades por sistemas que eviten la radiación, como guías de ondas o cables coaxiales.

En una primera fase, el LEP fue diseñado con cavidades que comunicaban a los haces de electrones y positrones la energía de 55 GeV cada uno, pero con la previsión de sustituirlas por cavidades superconductoras, que aumentarían la energía de

cada haz a 100 GeV cuando se culminara el proyecto de diseñar y construir varios prototipos de cuatro celdas (Fig. 9).



Figura 9: Cavidades de aceleración en el túnel del LEP

Con corriente continua pura el estado superconductor presenta una resistividad nula, pero en corriente alterna se presentan siempre pérdidas, que aumentan con la frecuencia. En los aceleradores las cavidades están alimentadas a muy alta frecuencia, y por ello el campo penetra por la superficie interior de las paredes con muy poca profundidad: en las superconductoras no es necesario que estén construidas en material superconductor sino que es suficiente que sean en cobre (como las normales o resistivas) y tengan la pared interna recubierta del material superconductor, como el niobio, con espesor de unas pocas micras. La resistencia superficial, que en estas condiciones no es nula pero sí muy baja, está muy afectada por las irregularidades de la superficie, por lo que reciben un tratamiento para tener la superficie lo más uniforme posible: electropulido, limpieza química o de alta temperatura.

En la segunda fase, las cavidades superconductoras, trabajando en su criostato a la temperatura del helio líquido, 4,2 Kelvin, permitieron que el LEP duplicara la energía con que son aceleradas las partículas reduciendo al mismo tiempo la potencia consumida de manera importante. El funcionamiento ha sido muy satisfactorio, tanto desde el punto de vista tecnológico, que en su fase final permitió aumentar aún más la energía de colisión, como en los resultados de los experimentos con las partículas, hasta el desmantelamiento del LEP en

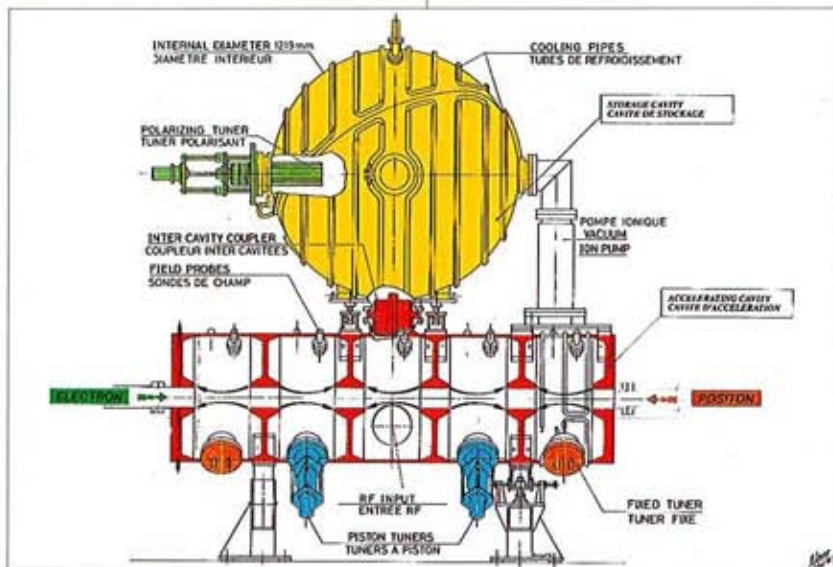


Figura 8: Módulo múltiple de cavidades con esfera de almacenamiento de la energía de alta frecuencia entre el paso de los paquetes de partículas



noviembre de 2000 para montar en su lugar el nuevo colisionador LHC.

### Imanes

Todas las operaciones que se efectúan sobre los haces de partículas son realizadas mediante campos magnéticos: hay operaciones de inyección en el anillo, extracción y transferencia de un preacelerador a otro y al anillo final, etc: pero las funciones más destacadas (las que obligan a una máquina de 27 km de longitud para alcanzar la energía deseada), son las de guiado de los haces de partículas en su órbita, manteniendo los haces en las condiciones apropiadas para el momento de la colisión.

Los haces de partículas se desplazan por un tubo situado en el centro de la superficie polar de un imán en forma de C, superficie de gran anchura para asegurar un campo magnético perfectamente uniforme en la zona de la trayectoria de las partículas. La intensidad del campo es relativamente baja (1,35 Tesla), para lo cual no fue necesario construir el circuito magnético macizo en toda su longitud sino de chapas de hierro con separadores intercalados, los huecos rellenos de hormigón para tener un circuito rígido e indeformable.

Estos dipolos están montados en serie en módulos de seis unidades de 6 metros de longitud, junto con otros imanes multipolares, haciendo un total en el LEP de 3.392 dipolos, 816 cuadrupolos, 504 sextupolos y cantidades menores de otros pequeños multipolos (octupolos, dodecapolos, etc).

En los anillos de almacenamiento de los aceleradores, el comportamiento de los haces de partículas se suele comparar, por su semejanza, con el de la óptica de la luz: los dipolos desvían el haz de la misma forma que el prisma desvía el rayo de luz: ésta entra en el prisma como un solo rayo pero sale dispersada en los colores por su diferente índice de refracción con la diferente longitud de onda: de manera similar, en el dipolo las partículas entran en un haz compacto y se dispersan por tener variaciones en su momento. La lente convergente (la lupa) concentra los rayos

de luz en un punto, el foco, y esta función la realizan en los aceleradores los *cuadrupolos de focalización*, que concentran las partículas dispersadas en los dipolos (Fig. 10). En la

con bajo contenido de carbono y otras impurezas para lograr una alta permeabilidad: en el caso de proceder de diferentes coladas (sólo en los dipolos del LEP se han utilizado 14.000

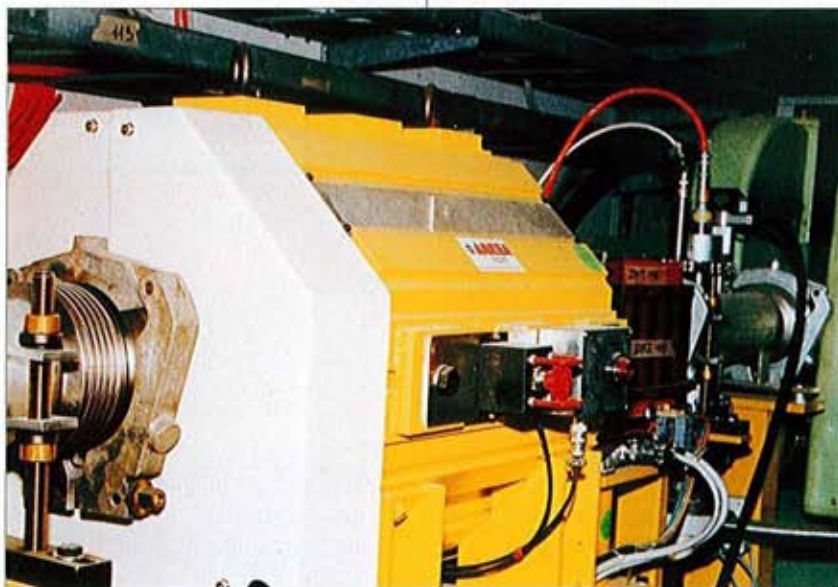


Figura 10: Cuadrupolos de focalización del LEP

realidad, la lente simple concentra un rayo de luz monocromática en un punto: con la luz normal la distancia focal varía con el índice de refracción, y se alarga en una línea con todos los colores del arco iris, lo que se conoce como *aberración cromática*, cosa que puede corregirse con una combinación de lentes de diferente material. En los aceleradores, las diferencias en el momento de las partículas producen en los cuadrupolos unas distancias de enfoque diferentes, y en consecuencia oscilan, tienen una inestabilidad transversal, como una ondulación que produce pérdidas. Este efecto, que, por similitud con la óptica de la luz, se conoce como *cromaticidad*, se corrige con *sextupolos de corrección*, colocados a continuación de los cuadrupolos que lo han producido (Fig. 11).

La primera condición que deben cumplir los imanes es la calidad del campo magnético que, prescindiendo de la corriente continua de excitación, filtrada y estabilizada, depende totalmente del núcleo magnético: la calidad del material y la precisión en su fabricación. El núcleo está construido con chapa de acero dulce recocido,

se deben entremezclar las chapas para tener una calidad de las mismas lo más homogénea posible. Las chapas se cortan con troquel de alta precisión, sin rebabas (no sólo en la superficie polar sino en todo su contorno) para tener superficies de referencia para componer los paquetes, y luego armarlos y alinearlos en la circunferencia del LEP. Las chapas de los polos (cuadrantes, sextantes,...) se apilan en un armazón y se sueldan con un proceso cuidadoso



Figura 11: Sextupolo corrector



que evite las tensiones y deformaciones, o según el modelo las chapas han tenido una preimpregnación con resinas y posterior curado para hacer un bloque compacto y de medidas muy precisas.

Los bobinados se fabrican con conductor hueco (cobre o aluminio) para su refrigeración con agua desionizada de características perfectamente dieléctricas, y sufren un proceso de impregnación en un molde bajo vacío y presión, con resina epoxy resistente a la radiación inherente a los aceleradores de partículas. Los núcleos, con sus bobinas sólidamente fijadas, se arman en un utillaje que confiera al electroimán unas dimensiones muy precisas: finalmente las conexiones entre bobinas, eléctricamente en serie para que estén recorridas por la misma intensidad de corriente, e hidráulicamente en paralelo (con manguitos de material aislante) para garantizar una buena evacuación del calor generado en el conductor.

El diseño de estos imanes es muy complejo y tiene en cuenta varias facetas: un cálculo magnético, con la intensidad y forma de distribución del campo, que viene condicionada por el perfil del polo: en los dipolos es una superficie plana, con los extremos corregidos por el efecto de las puntas; en los cuadrupolos, el perfil polar es el de una hipérbola equilátera; en los sextupolos, el de una parábola de segundo grado; en los multipolos, el de figuras geométricas más complejas. El cálculo mecánico, ligado al anterior, tiene en cuenta los cálculos eléctrico, térmico e hidráulico, los esfuerzos electromagnéticos, la refrigeración, etc. Todos ellos están realizados por medio de sistemas de cálculo de elementos finitos.

Los controles y ensayos están orientados principalmente al aspecto mecánico para asegurar las características del campo magnético y la ali-

neación del eje magnético a lo largo de los 27 km del anillo de imanes. Además, están los ensayos eléctricos (resistencia, rigidez dieléctrica), hidráulicos (pérdida de carga), etc.

**Vacío**

Las partículas *viajan* por la circunferencia del anillo en dos haces separados y paralelos, en sentido opuesto, en el interior de una cámara de aluminio refrigerada por agua, de forma elíptica y unos 100 mm de anchura, en el que se han usado técnicas de ultravacío ( $8 \times 10^{-12}$  Torr). La razón es impedir que los haces de partículas puedan chocar con moléculas de aire residuales. La fabricación de las cámaras fue un importante desafío tecnológico pues están formadas por canales independientes para las partículas, el agua de refrigeración y el sistema de vacío, todo ello con un recubrimiento de plomo para absorber la radiación creada por las partículas. La cámara está formada por piezas de aluminio de 12 metros de longitud unidas por manguitos flexibles (Fig. 12).

El vacío se consigue en dos fases: la primaria con 2.300 bombas iónicas distribuidas a lo largo del canal del haz, y complementada por una bomba *Getter*, una cinta de aluminio recubierta de polvo de circonio, activado por calentamiento, que atrae y retiene las moléculas residuales del aire: actúa como una cinta *atrapamoscas*.

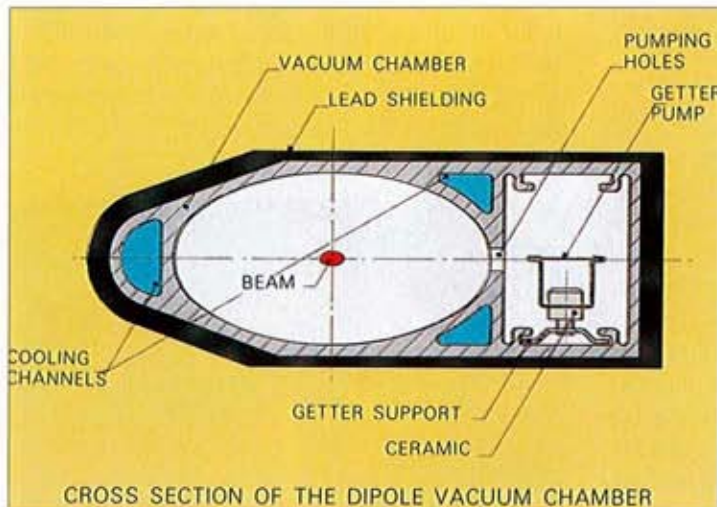


Figura 12: Sección de la cámara de vacío del LEP con el haz de partículas, el circuito de refrigeración y la cinta "Getter"

**Detección y análisis**

En las cuatro cavernas en el túnel del LEP están situados los cuatro medios preparados para registrar los fenómenos producidos en la colisión de los haces de partículas. Desde la época de **Rutherford**, que estudiaba la forma y cantidad de los puntos luminosos en la pantalla fosforescente de sus experimentos, hasta nuestros días, estos sistemas han tenido una evolución extraordinaria. Se pasó más tarde a registrar los resultados de las colisiones

en placas fotográficas y a desarrollar métodos más sofisticados, algunos de los cuales de importancia tan sobresaliente en el estudio de la Física que merecieron recibir el Premio Nobel, como la cámara de condensación de **C. T. Wilson** en 1927, la cámara de niebla de **P. M. Blackett** en 1948, la de burbujas de **D. A. Glaser** en 1960, y en 1992 la multifilar proporcional de **G. Charpak** en el CERN (Fig. 13).



Figura 13: "Los físicos son como los cazadores, siempre con la esperanza de cobrar alguna pieza excepcional. Por mi parte, yo decidí dedicarme a proporcionarles las armas adecuadas": **Georges Charpak**, premio Nobel por la invención de un detector de excelente resolución espacial y temporal



Los detectores actuales están constituidos por cientos de miles de sensores de diferentes funciones para conocer las características de las partículas originadas en la colisión: pero su misión sería ineficaz si no estuviera apoyada por programas apropiados de un potentísimo sistema de ordenadores: cuando se produce una colisión, el detector capta una información muy abundante, parte de ella interesante pero acompañada de mucho ruido. Y, aunque es muy importante la ayuda del ordenador para analizar los fenómenos producidos, la experiencia y el criterio del científico son siempre los que determinan los resultados.

Los cuatro detectores del LEP, de nombre *Aleph*, *Delphi*, *Opal* y *L3*, son aparatos enormes y complejos formados por capas concéntricas de diferentes tipos de sensores para captar las características de las partículas "creadas" en la colisión: masa, carga, momento, energía, *spin*..., todo rodeado por un fuerte electroimán "cerrado", para que no escape una partícula sin ser detectada: en *Aleph* y *Delphi* los imanes son superconductores, mientras en *Opal* y *L3* son imanes convencionales, éste último con un circuito magnético de 8.500 toneladas de acero. Los cuatro son detectores universales pero cada uno destaca más en determinada técnica de detección según las características del tipo de partícula a estudiar.

### EL LEGADO DEL LEP: EL LHC

El LEP fue clausurado a finales de 2000 después de trabajar varios años a pleno rendimiento (incluso forzando la energía de la segunda fase de 100 GeV hasta 114 GeV), resultando sus experimentos fundamentales para confirmar la validez del Modelo Estándar (SM). El LEP se diseñó de modo que en el túnel se pudiera instalar un segundo acelerador con el que se pudiera trabajar conjuntamente, pero finalmente se optó por desmontarlo (Fig. 14).

Seguir profundizando en el conocimiento de la materia es seguir construyendo aceleradores de mayor energía.



Figura 14: Instalación y alineación de los imanes dipolos superconductores en el túnel del LHC

El LEP será, con toda probabilidad, la última máquina circular de leptones por la radiación sincrotrón que produce, que aumenta con la energía del haz: por ello se decidió que el siguiente acelerador, con un nivel mayor de energía, sería de protones, el LHC, que no produce radiación sincrotrón significativa, pues es inversamente proporcional al radio de curvatura y la cuarta potencia de la masa de la partícula (la del protón es 1.838 veces la del electrón).

Los imanes con un canal único para los dos haces, como en el LEP, han de ser para partículas de distinta carga, para que, con el mismo campo magnético, giren en sentido opuesto, en este caso del LHC, protón y antiprotón. Producir protones es una operación simple y el anillo puede quedar lleno en pocos minutos, pero producir antiprotones es un proceso de muy baja eficiencia: se necesitan 300.000 protones para un solo antiprotón. Deben ser acumulados durante horas antes de poder ser utilizados: es un procedimiento que sirvió en el SPS para descubrir las partículas W y Z, pero inviable con la energía del LHC. Por esta razón el colisionador protón-protón debe ser con dos

canales independientes para las partículas.

Los dos canales de partículas pueden ser en dos anillos de imanes independientes, pero, tras varios estudios y diseños, se optó por el concepto de "dos-en-uno": dos canales, con sus bobinas, separados y paralelos en un plano horizontal y con el resto de toda la estructura común (collar de compresión y culata magnética). Los canales, de 56 mm de diámetro y separados 194 mm, se entrecruzan en cuatro puntos para que los dos haces tengan recorridos de igual longitud y estén sincronizados.

El objetivo de aumentar la energía sólo se puede conseguir mediante un aumento descomunal de la longitud del acelerador o con imanes con mayor campo magnético para mantener en órbita las partículas. Los imanes convencionales, utilizados hasta la fecha, tienen el campo magnético limitado por la saturación del hierro que forma el circuito magnético. Campos más intensos sólo pueden ser conseguidos empleando imanes superconductores.

La estructura del LHC es la misma que en el LEP (Fig. 15), con las modificaciones necesarias para los nuevos



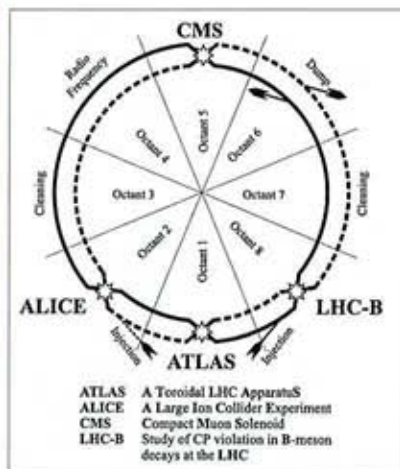


Figura 15: Esquema de la estructura del LHC

componentes: ocho arcos de circunferencia unidos por ocho tramos rectos de 528 metros. Cada arco está formado por 23 celdas idénticas de 107 metros y cada celda contiene seis imanes dipolos de guiado del haz, cuatro cuadrupolos de focalización y varios pequeños multipolos de corrección: a éstos hay que añadir los imanes para insertar y extraer los haces, onduladores, supresores, etc. En total, los grandes imanes son 1.746, de ellos 1.232 dipolos.

El sistema de preaceleración del LEP (*Linac-Booster-PS-SPS*) se aprovecha también para la inyección en el LHC, con energía de 450 GeV, que luego es aumentada a los 7,7 TeV nominales por haz del LHC mediante las cavidades de aceleración; éstas, similares a las del LEP, alcanzan la energía alimentadas por *klystrones* a la frecuencia de 400 MHz. La producción de partículas no se realiza de manera continua sino en forma de grupos o "paquetes" que son transferidos periódicamente hasta que el anillo está lleno. Cuando se llega a esta condición, el haz de cada sentido de giro es un tren de 2.835 paquetes de  $1,05 \times 10^{11}$  protones, separación entre paquetes de 25 nanosegundos ( $10^{-9}$  s).

Una característica de un *colisionador* tan importante como la energía es la conocida como *luminosidad* (de nuevo la similitud con la óptica de la luz), un parámetro que se resume en tres factores: fuerte focalización de

los haces de partículas en una zona pequeña de colisión, gran número de partículas por paquete y máximo posible de paquetes (frecuencia): energía y *luminosidad* se complementan.

### Superconductividad

Se trata de un fenómeno físico de algunos materiales por el que la resistencia que ofrecen al paso de la corriente eléctrica desaparece totalmente por debajo de cierta temperatura. Fue descubierto por **K. Onnes** en 1911 cuando inició sus experimentos con materiales a baja temperatura después de haber logrado licuar el helio por debajo de 4,7 K (Kelvin), y posteriormente encontrar un cambio de fase a 2,17 K por debajo de la cual las propiedades del helio cambian radicalmente, como un aumento significativo de la conductividad térmica y la disminución de la viscosidad, propiedades de gran interés. Este estado se conoce como *helio superfluido* o He II.

Las experiencias con metales mostraron que el estado superconductor se produce por debajo de una temperatura crítica  $T_c$ , con valores tan diferentes como 9,2 K para el niobio y 0,01 K para el tungsteno. Las investigaciones en este campo han encontrado aleaciones con valores más altos del  $T_c$ , como los 9,5 K para el niobio-titanio (Nb Ti), que es actualmente el material de uso generalizado, y 18,1 K para el niobio-estaño (Nb<sub>3</sub> Sn), si bien ésta última es de difícil aplicación práctica en la construcción de máquinas eléctricas por necesitar un tratamiento térmico a temperaturas no soportadas por la mayoría de los aislamientos eléctricos. Desde hace 20 años se han preparado aleaciones de tipo cerámico (óxidos metálicos) con  $T_c$  tan alta como 90 K (Superconductores de alta temperatura), muy por encima de 77 K, la temperatura de ebullición del nitrógeno líquido: su aplicación práctica está muy limitada por sus características mecánicas.

El principal factor que limita la potencia de una máquina eléctrica es el calentamiento, producido en su mayor parte por efecto **Joule** en la resistencia del conductor con el paso de la

corriente: la posibilidad de fabricar aparatos eléctricos con conductores sin resistencia ofrece posibilidades inmensas, pero, en la práctica y en la actualidad, la necesidad de trabajar a temperatura por debajo del valor crítico limita enormemente las aplicaciones, reducidas en particular a las que necesitan campos magnéticos intensos, como aceleradores de partículas, tracción y levitación magnéticas, Medicina (RMN), almacenamiento de energía, etc.

La superconductividad tiene una amplia utilización en el LHC, principalmente en los imanes, las cavidades de aceleración y los detectores, cada uno de estos grupos con características propias. Una aplicación singular va a ser el empleo de terminales de alimentación en las cajas de conexión de los imanes superconductores, pasando la corriente con un extremo a la temperatura ambiente y el otro inmerso en el helio líquido: estos terminales son cintas que contienen Superconductor cerámico de alta temperatura, la primera vez que se usan estos materiales a esta escala.

Pero las posibilidades de la superconductividad no son ilimitadas dado que, además de la temperatura, hay otros dos parámetros críticos: el campo magnético y la densidad de corriente. Estos tres factores, colocados en un espacio tridimensional de coordenadas, representan la zona de trabajo del superconductor, una especie de tetraedro cuyos vértices son los parámetros críticos y el origen de coordenadas: fuera de ese espacio se

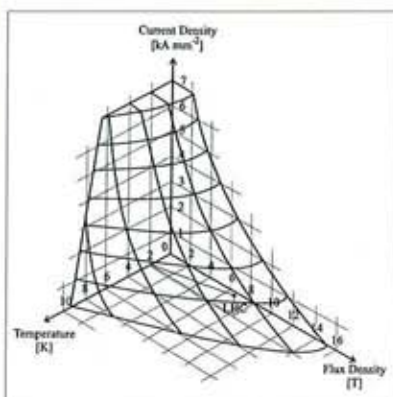


Figura 16: Región superconductora y transición de fase de la aleación niobio-titanio



pasa del estado superconductor al resistivo, se produce un *quench* (apagado).

Para los conductores de NbTi, los otros dos parámetros críticos son la intensidad de campo magnético  $H_c=15,2$  Teslas y la densidad de corriente, difícil de medir pero superior a  $J_c=10 \text{ kA/mm}^2$  (Fig. 16).

### Imanes

El CERN realizó un intenso programa de investigación, en colaboración con la industria, para el diseño de los imanes: se prepararon prototipos a escala natural y en 1995 se definió el diseño (Fig. 17).

mm de diámetro de circulación del haz, una encima y la otra debajo, de modo que el campo es vertical. La uniformidad del campo en el tubo le da la forma de las bobinas: la forma ideal sería de una "media luna", con la parte más gruesa la más alejada del centro del tubo. En la práctica, esa forma ideal se logra, parcialmente, construyendo la bobina en dos capas y colocando espaciadores en la zona donde la bobina debe ser más delgada.

**Conductor.** Las dos capas de cada bobina tienen conductor diferente ya que la capa externa, más alejada del centro, está sometida a un campo

el enrollamiento ha de ser con una tensión adecuada en el conductor, debidamente aislado entre espiras, entre capas y a masa, aislamiento preimpregnado con resina resistente a la radiación. Por su estructura, la bobina no admite esfuerzos de tracción o cortadura, sino que debe trabajar siempre a compresión. Otros esfuerzos a los que está sometida son los ocasionados por el salto térmico entre la temperatura ambiente y los 1,9 K de trabajo.

**Conformado de la bobina.** La bobina, con su mandrino de enrollamiento, se introduce en un molde que le da la forma y dimensiones muy precisas: un punto crítico es las cabezas de bobinas, con espaciadores para limitar la concentración de campo. Tras el curado de la resina, la bobina queda compacta y sólida.

**Estructura mecánica.** Es común para los dos canales de haz. Consta de tres partes: **collar** que abraza las bobinas con los canales, formado de dos mitades de chapa apilada de aluminio; **culata magnética** rodeando el anterior, con corte vertical, de chapa de acero de alta permeabilidad, con triple cometido: reforzar el campo en el canal, evitar la dispersión del campo por el exterior y almacenar energía en caso de un *quench*, el paso del estado superconductor al resistivo; y la tercera parte es el **cilindro de compresión**, que mantiene rígido e inmóvil todo el conjunto.

La construcción y el ensamblaje de los elementos mecánicos ha exigido unos cálculos y tolerancias muy precisos, con caracterización de los prototipos de las bobinas para conocer su módulo de elasticidad y comportamiento a tan baja temperatura: la solidez e inmovilidad de las bobinas garantizan la calidad del campo y evitan el desplazamiento debido a los esfuerzos electromagnéticos y a los diferentes coeficientes de dilatación de los componentes del conjunto, que darían origen a fricciones con pequeños calentamientos capaces de ocasionar *micro-quenches* locales.

Un aspecto importante que tiene en cuenta el cálculo mecánico es la deformación que puede sufrir el conductor con los esfuerzos a que está sometido

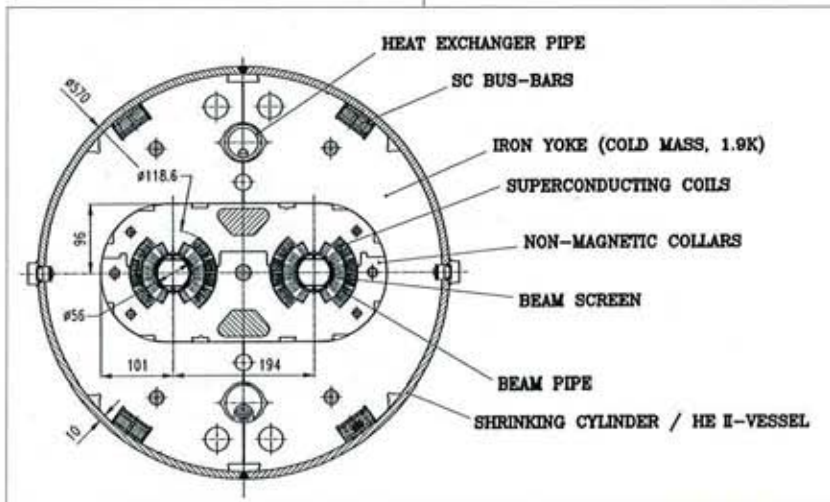


Figura 17: Sección transversal de la "masa fría" del dipolo superconductor

Son muchos los factores a considerar, todos ellos interrelacionados: se describen brevemente para los dipolos pero son válidos para todos los tipos de imanes:

**Cálculo del campo magnético.** La estabilidad y permanencia de los haces circulando durante horas necesita una calidad del campo con precisión de una diezmilésima: la calidad está asegurada por una precisa geometría de las bobinas; unos programas de cálculo determinan la intensidad y dirección en cada punto, permiten trazar un "mapa", no sólo en el canal del haz sino en todo el circuito magnético, en particular la propia bobina.

**Disposición de las bobinas.** En cada canal del dipolo las dos bobinas están dispuestas longitudinalmente horizontales abrazando el tubo de 56

menor y admite una densidad de corriente más alta. El conductor es un cable formado por dos a tres docenas de hilos circulares torsionados, cada uno con miles de filamentos de niobio-titanio de unas pocas micras, embebidos en una matriz de cobre; el trenzado de hilos está conformado a una sección ligeramente trapezoidal para adaptarse a la curvatura del tubo del haz.

**Esfuerzos y tensiones.** Las fuerzas electromagnéticas a que están sometidas las bobinas son enormes, de cientos de toneladas, producto de la corriente que las atraviesa (intensidad nominal de 11.500 A) y el campo que ella misma crea (8,5 Tesla). Las espiras de la bobina, recorridas por corrientes paralelas en el mismo sentido, tienden a separarse, por lo que



pues afecta sensiblemente al valor de la densidad de corriente crítica.

Uno de los ensayos finales del imán es determinar su corriente crítica provocando sucesivos *quenches*, que se producen a intensidades de corriente cada vez más alta hasta que se estabiliza en un valor máximo, lo que se conoce como *training*, es decir que el imán "está en forma": este fenómeno es debido a la recolocación de los conductores a posiciones más estables.

Al producirse un *quench*, el aumento de la resistencia del conductor origina más calentamiento que se propaga por todo el bobinado: es necesario detectarlo y corregirlo derivando la corriente, o en el caso de no extinguirse, extraer toda la energía de los bobinados sobre resistencias de protección para evitar el daño al imán: el análisis de este problema es una combinación de cálculos eléctrico y térmico.

**Criogenia**

El objetivo del sistema criogénico es mantener los bobinados y toda la estructura magnética a la temperatura del helio superfluido, con doble finalidad: utilizar al máximo la corriente que puede admitir el material superconductor y aprovechar las excepcionales características del He II, como gran conductibilidad térmica y baja viscosidad. Toda la estructura magnética está inmersa en un baño estático a 1,9 K, temperatura con margen suficiente con la línea  $\lambda$  de 2,17 K, la transición entre He II y He I.

El recipiente en el que el imán se mantiene a esa temperatura es el criostato, una aplicación del conocido vaso *Dewar*, un recipiente de doble pared en cuyo interior se aloja el material que se desea mantener a temperatura constante, fría o caliente (el clásico *termo*), el exterior está a temperatura ambiente, y en el espacio intermedio se realiza un vacío elevado que es el aislante que impide la transmisión de calor entre exterior e interior. Es un aparato muy común, con aplicación en todos los casos en que hay que trabajar a bajas temperaturas, pero que en el LHC reúne características muy especiales que han exigido un diseño y unos cálculos muy preci-

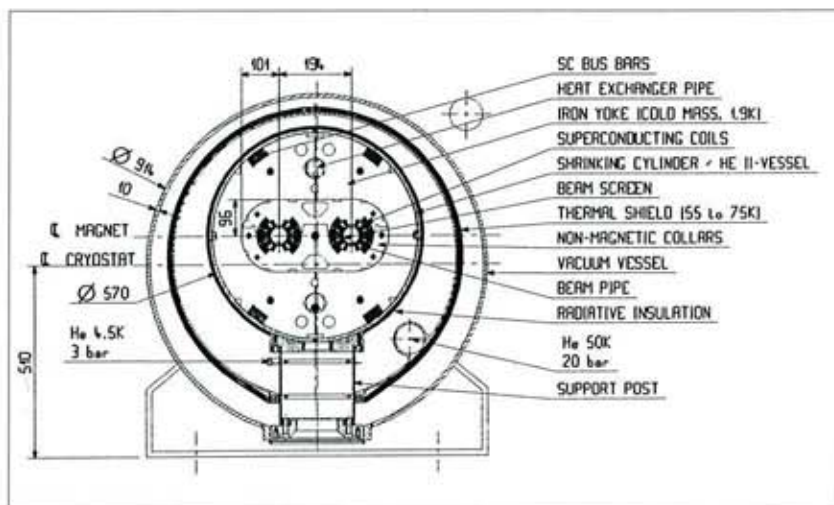


Figura 18: Sección transversal del dipolo en su criostato con el intercambiador de calor

sos, con la construcción de varios prototipos hasta el diseño definitivo.

Dentro del criostato se alojan todos los imanes, dipolos principales, cuadrupolos de focalización, sextuplos y decapolos de corrección, etc: todos estos componentes, lo conocido como masa fría, están en un baño de He II, estático y ligeramente presurizado, que penetra por los rincones más recónditos del imán y extrae el calor que pueda producirse en *micro-quenches*; el propio cilindro de precompresión es la pared interior del vaso. El cilindro exterior, el vaso de vacío, es un tubo de acero de pared gruesa, de 15 metros de longitud, con los extremos cerrados al igual que el tubo interior: en el espacio intermedio el vacío es de  $10^{-4}$  Pa ( $10^{-6}$  mbar). El importante peso de la masa fría descansa sobre el cilindro exterior en tres apoyos: el central, fijo longitudinalmente pero deslizante de manera lateral para adaptarse a la curvatura, y dos extremos, deslizantes longitudinalmente para absorber la contracción térmica al enfriar la máquina (Fig. 18).

Estos apoyos, hechos de placas de fibra de vidrio-epoxy de baja conductividad térmica, tienen gran in-

fluencia en los cálculos térmicos pues son el contacto físico más importante entre la masa fría a 1,9 K y el cilindro exterior a la temperatura ambiente. Además la cámara de vacío contiene dos pantallas para absorber el calor radiado del exterior: una, termalizada entre 50 K y 70 K, es una envolvente de aluminio recubierta de 30 capas de finas láminas separadas de poliéster aluminizado en ambas caras; la segunda, termalizada entre 5 K y 20 K y próxima al cilindro interior, consta de 10 láminas del mismo tipo (Fig. 19).

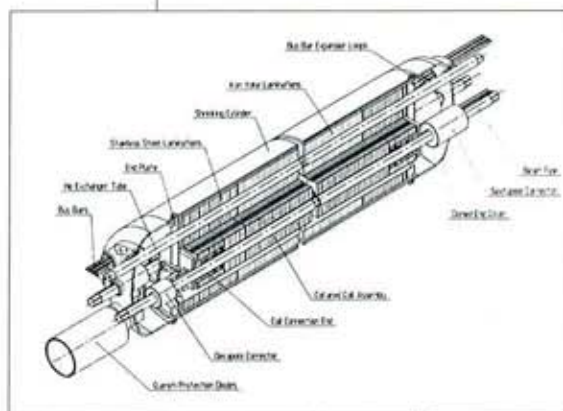


Figura 19: Conjunto de los componentes de la "masa fría" del criostato: dipolo principal, decapolos y sextuplos de corrección, barras de alimentación, sistemas de protección del "quench", etc.

Los cálculos térmicos tienen en cuenta todas las aportaciones (radiación sincrotrón, canales de guiado de las partículas, terminales de alimentación eléctrica, conexiones de los sis-



temas de medida, control, protección...), que deben ser absorbidas por un intercambiador de calor distribuido a todo lo largo de la circunferencia de la máquina. Es una tubería recorrida por He II saturado, que traslada a las ocho instalaciones refrigeradoras el calor extraído de los imanes por el He II estático, que por sus excelentes propiedades mantienen los imanes a temperatura cuasi-constante independientemente de la distancia.

Cada uno de los ocho sectores en que está dividido el LHC es enfriado por una instalación criogénica consistente en un refrigerador de 4,5 K acoplado a otra unidad de 1,8 K. Las líneas de distribución de cada sector alimentan la máquina y reciben el retorno cada 110 m, con una diferencia térmica inferior a 0,1 K. La masa total a enfriar a 1,9 K es de 37.500 toneladas, por medio de 96 toneladas de helio, de las cuales un 60% llena los imanes y el resto se reparte en las

refrigerador con nitrógeno líquido a 80K durante unos 10 días.

**Detectores**

Una descripción, aunque sea somera, de estos componentes del LHC se sale del ámbito de este artículo por su complejidad. Desde el primer momento, se planteó la necesidad de que estos detectores fueran de mayor tamaño, potencia y precisión de los del LEP, dada la naturaleza de los fenómenos a investigar y las condiciones de la colisión: mayor energía y sobre todo "luminosidad". Varios laboratorios y centros de investigación europeos, entre ellos el **Ciemat** (Madrid), han participado en el diseño y construcción de estos cuatro aparatos: *ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus)*, *ALICE (A Large Ion Collider Experiment)*, *CMS (Compact Muon Solenoid)* y *LHC-B (Study of CP violation in B-meson decays at the LHC)*. La Figura 20 es una muestra de la complejidad y las dimensiones de estos de-

cantidad de datos con la gran rapidez requerida.

Mas de 6.000 científicos participarán en los experimentos del LHC, y los datos se analizarán en más 100 laboratorios y universidades de 30 países.

**EL ACELERADOR DEL FUTURO**

La comunidad científica mundial tiene puestas sus esperanzas en los resultados que se obtendrán en el LHC, y, en los últimos años, los ECFA (*European Committee for Future Accelerators*), ACFA (*Asian Committee for Future Accelerators*) y HEPAP (*High Energy Physics Advisory Panel*, USA), habían llegado a un consenso en que el próximo acelerador importante para la física de las partículas sería un colisionador rectilíneo de electrones-positrones y energía de 500 GeV (con capacidad para ser ampliada). Esta será la máquina ideal para desarrollar los experimentos del LHC y abrir nuevos horizontes, que además de la partícula Higgs, cuyo descubrimiento ya fue vislumbrado en el LEP (Fig. 21), se orientarán en las dimensiones extra-espaciales y en la supersimetría, que, junto con otros modelos de Física y de acuerdo con cálculos teóricos precisos, contienen partículas que pondrían de manifiesto (al menos en parte) la materia oscura del cosmos.

El acelerador lineal ILC (*International Linear Collider*) será de unos 20 km con los haces de partículas

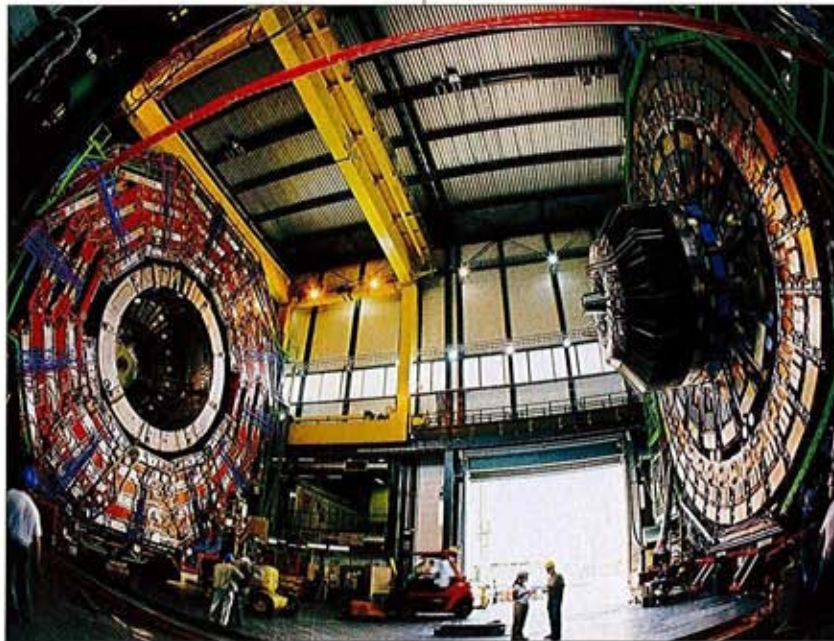


Figura 20: Las gigantescas piezas del detector CMS en fase acoplamiento entre el cuerpo central y la pieza de cierre derecha (falta representar la de la izquierda). El cuerpo pesa 1.300 toneladas

tuberías de distribución y las instalaciones refrigeradoras.

El enfriamiento de todo el conjunto está calculado que tendrá una duración de cinco semanas, en el que una primera fase será con un pre-re-

tectores: representa el cuerpo central y la tapa derecha del detector CMS.

El reto tecnológico que representan los detectores viene acompañado por el que plantean la captación, procesado y transporte de la ingente

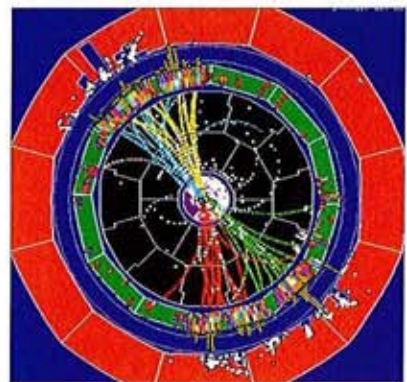


Figura 21: Un ensayo en el detector ALEPH del LEP muestra un abanico de trayectorias de partículas que sugieren la posibilidad del descubrimiento de un bosón Higgs



acelerados y fuertemente focalizados hasta el punto central de colisión, donde detectores específicos registrarán los fenómenos producidos.

Para definir la política europea sobre la Física de las altas energías, el ECFA ha creado un **Grupo de Estrategia** que ha preparado un documento sobre sus objetivos para el próximo decenio, reflejados de manera extractada en el preámbulo:

*La física de las partículas está en el umbral de una nueva y excitante era de descubrimientos. La nueva generación de experimentos explorará nuevos campos y sondeará en profundidad la estructura del espacio-tiempo. Medirá las propiedades de los constituyentes elementales de la materia y sus interacciones con precisión sin precedentes, y descubrirá nuevos fenómenos como el bosón Higgs o nuevas formas de la materia. Enigmas sin resolver durante largos años, como el origen de la masa, la asimetría materia-antimateria del universo, y la energía y materia oscuras que llenan el cosmos, pronto se beneficiarán de las revelaciones que se obtendrán con las nuevas mediciones. En conjunto, los resultados dejarán un profundo impacto en la manera de cómo vemos el universo.*

**LA INDUSTRIA ESPAÑOLA Y LA SUPERCONDUCTIVIDAD**

En 1988, una vez puesto en marcha el diseño del LHC, un científico español en el **CERN**, **Juan Antonio Rubio**, actual Director General del **Ciemat**, propuso que la industria española participase en el LHC con equipos de alta tecnología, aunque en la construcción del LEP ya había colaborado con imanes convencionales, fuentes de potencia, componentes de detectores, elementos mecánicos, y sobre todo en obra civil (construcción del túnel de 27 km).

Entre las tecnologías posibles, la propuesta se decantó por los imanes superconductores y sus equipos auxiliares complementarios (criostatos y fuentes de alimentación), por el futuro prometedor que ofrecen, además de los aceleradores de partículas.

Con tal motivo se constituyó la agrupación **ACICA** (**Abengoa**, **Cene-**

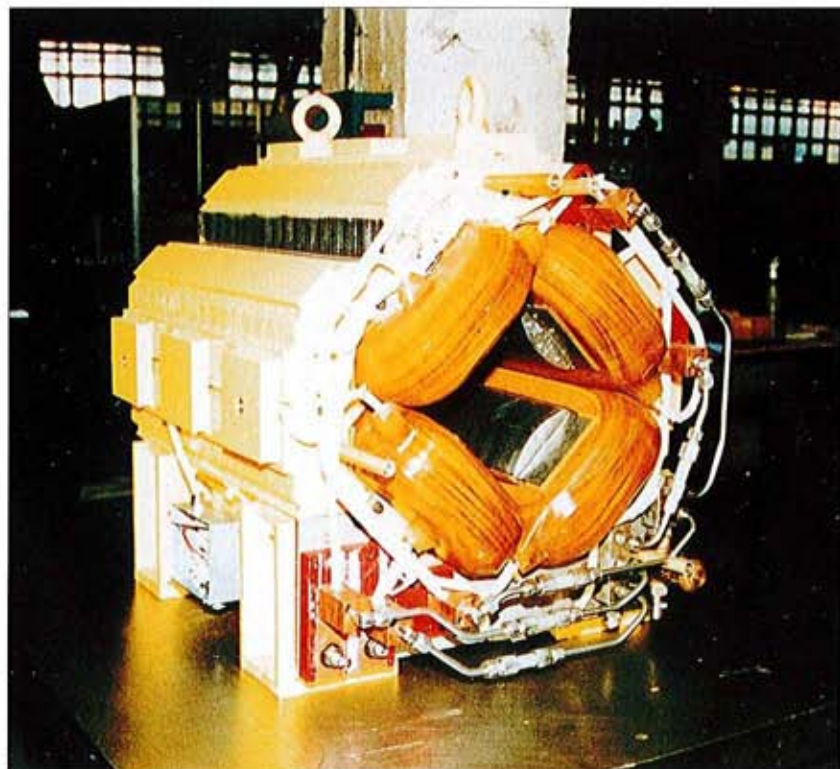


Figura 22: Cuadripolo mostrando las conexiones eléctricas e hidráulicas entre bobinas

mesa, Indar, Canzler, Ame) y, en junio de 1989, se firmó un acuerdo con el **CERN** para la construcción del prototipo de un cuadrupolo de sintonía (*Tuning Quadrupole*). Dos ingenieros españoles se desplazaron a Ginebra y durante varios meses colaboraron en el diseño del imán, adquiriendo los conocimientos apropiados para la construcción del prototipo, que fue terminado en la empresa **Indar** en 1992 y ensayado en el **CERN** con excelentes resultados. Al mismo tiempo, se construyeron y ensayaron con éxito prototipos de criostato y equipo de potencia.

Las duras condiciones de la reconversión industrial de los años 90 hicieron que desapareciese **ACICA** como agrupación, quedando solamente **Abengoa** con los equipos de potencia y **AME** (actual-

mente **ANTEC**) con los imanes y criostatos.

Los más de 30 años de experiencia de **AME** en la fabricación de material electromagnético (electroimanes de elevación, separadores magnéticos) y frenos industriales (el primer fabricante español en ambos sectores), le capacitaba para afrontar un producto nuevo, con futuro y alto nivel tecnológico, evolucionando a con-

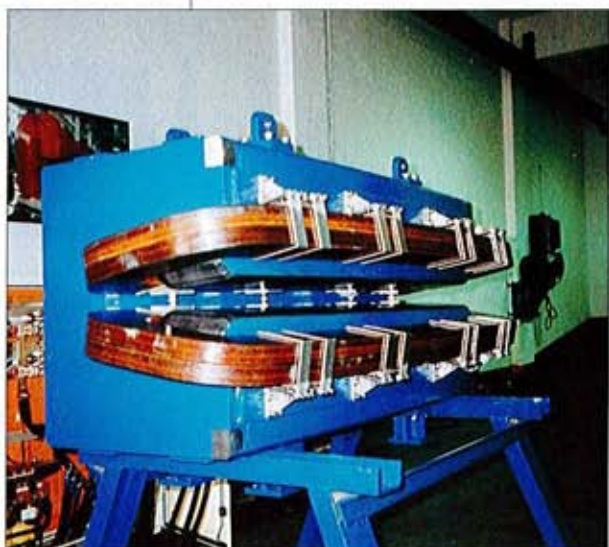


Figura 23: Dipolo curvo para el Síncrotrón ALBA



vertirse en **ANTEC**. A partir de ese momento, se han construido gran cantidad de elementos que pueden dividirse en tres grupos:

- Imanes convencionales para aceleradores.
- Aplicaciones superconductoras de baja temperatura.
- Aplicaciones superconductoras de alta temperatura.

### Imanes convencionales

Los imanes utilizados en aceleradores o aplicaciones similares se caracterizan por ser aparatos de elevadas prestaciones constituidos por un circuito de hierro que dirige la trayectoria del campo magnético y unas bobinas de excitación. En el apartado de los imanes del LEP antes descrito, ya se reflejan las características de estos aparatos: circuito magnético de forma apropiada a su función (dipolo, cuadrupolo, sextupolo,...) construido en acero de gran calidad y con tolerancias muy precisas para tener campo muy uniforme y una perfecta alineación del eje magnético; bobinados de excitación, refrigerados por agua desionizada a partir de un cierto tamaño, para mejor relación prestaciones-dimensiones.

**ANTEC** ha construido más de 100 aparatos de diversas características entre los que destacan:

+ 12 dipolos ondulatorios (*Wiggler*) de 4.000 kg de peso unitario.

+ 21 cuadrupolos de focalización en el preinyector del LEP (Fig. 4)

+ 20 cuadrupolos en la transferencia del *Proyecto Isolde-PS-Booster*, de 700 kg (Fig. 10 y 22)

+ 18 sextupolos de corrección en el anillo del LEP, de 1.000 kg (Fig. 11)

+ Prototipo de dipolo curvo combinado para el sincrotrón *ALBA* (Barcelona), de 3.500 kg (Fig. 23)

+ Dipolo-espectrómetro para **UAM** (Universidad Autónoma de Madrid), de 5.000 kg (Fig. 24)

+ Dos dipolos-*scanner* para **CNA** (Centro Nacional de Aceleradores), Sevilla.

+ Cinco imanes *Bumper* para el *Proyecto COSY* (*Cooling Synchrotron*) en Julich, Alemania.

+ 36 dipolos correctores verticales y horizontales del *Proyecto CTF3* del CERN.

### Aplicaciones superconductoras de baja temperatura

Para la fabricación de aparatos de material superconductor, **ANTEC** tuvo que equiparse adecuadamente mejorando las instalaciones que ya se habían preparado para los imanes convencionales: máquinas de bobinar especialmente diseñadas con control y regulación de velocidad y tensión

de bobinado; criostato con bombas de vacío en dos etapas, equipos eléctricos de alimentación, control y medida, ... todo ello en una *Sala Limpia* climatizada a temperatura estabilizada a 20 °C, humedad 60%, aire filtrado para limitar el contenido de polvo, ...

El primer imán superconductor (y el primero en España) fue un solenoide con campo superior a 10 Teslas para la creación de un Patrón de resistencia eléctrica para **ICMA** (Instituto de Ciencias de Materiales de Aragón): Véase una descripción en *DYNA*, octubre 1992. Tras otros solenoides para **ICMA** (Laboratorio del Ministerio de Obras Públicas, Madrid), se realizaron nuevos equipos (imán y criostato) para el proyecto *MIDAS* de almacenamiento de energía: una bobina de 25 kJ y otra de 1 MJ, ésta en un criostato con más de 1.000 litros de He líquido: la Figura 25 da una idea de los enormes esfuerzos que se desarrollan (más de 2.000 toneladas), absorbidos por bridas sujetas por 75 tornillos M 24 de alta resistencia (30 en el interior y 45 en el exterior) con arandelas elásticas para compensar contracciones térmicas.

El proyecto más importante ha sido la fabricación para el **CERN** de más de 1550 sextupolos (1.232 para cada uno de los dipolos principales del LHC, 120 de repuesto y los demás para complementar los de otro fabricante) y 190 octupolos, comenzando a principios del año 2000 (la Revista *DYNA*, junio 2000, transcribe una noticia del *Boletín CERN Courier*, mayo 2000), y terminando el suministro en diciembre 2005, con un ritmo de producción de 36 unidades mensuales.

Son pequeños aparatos correctores que acompañan a los dipolos en su criostato: seis bobinas en una sola capa, conductor de NbTi de 2,5 x 1,25 mm de sección para corriente nominal 1.000 A (densidad 320 A/mm<sup>2</sup>); los octupolos son similares, más largos, de 4 bobinas dispuestas para dar lugar a 8 polos (Fig. 26).

En los imanes superconductores del LHC ya se ha hecho referencia de las condiciones extremas en que trabajan, por lo que tienen unos contro-

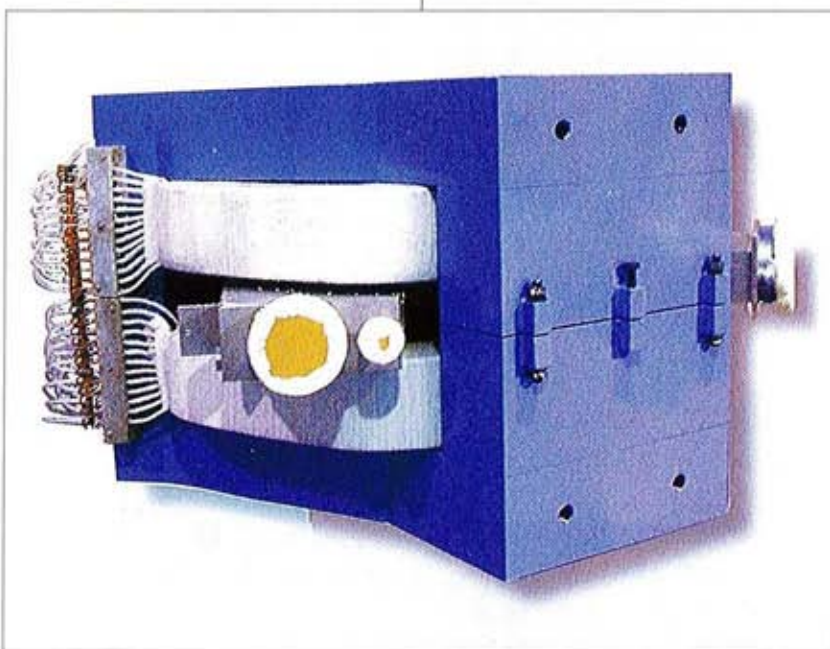


Figura 24: Dipolo-Espectrómetro para la Universidad Autónoma de Madrid



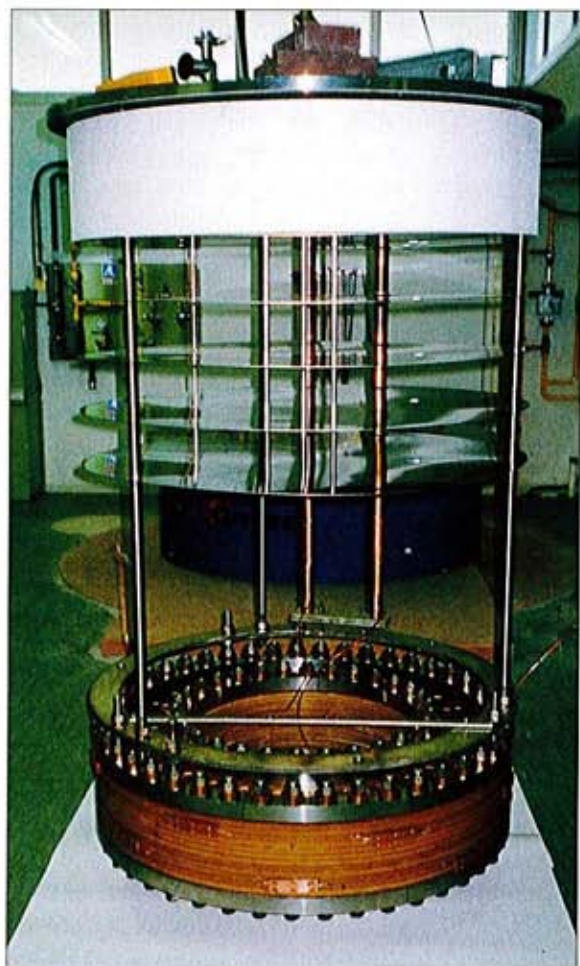


Figura 25: Bobina de almacenamiento de energía de 1 Megajulio para el proyecto MIDAS: al fondo, el criostato azul semienterrado

les rigurosos y unos ensayos finales para asegurar sus prestaciones: además de los clásicos ensayos eléctricos (aislamiento, rigidez, resistencia, ...) son importantes las medidas magnéticas, con un *mapeado* del campo y de las desviaciones entre el eje magnético y el mecánico. Pero el ensayo más importante es comprobar que el imán admite la corriente nominal con suficiente margen de seguridad sin que se produzca un *quench*, para lo que se realiza un *training*. Se introduce el imán en el criostato (por economía se hace con un grupo de 12 imanes), se llena de He líquido a 1,8 K y se alimenta sucesivamente cada uno de los imanes con corriente en rampa hasta producir un *quench*, con la protec-

ción adecuada para que la transformación en calor de la energía electromagnética almacenada no de lugar a evaporación del helio creando sobrepresiones peligrosas: se repite la operación tres o cuatro veces hasta llegar a un valor estabilizado: el imán está *en forma*.

**Aplicaciones superconductoras de alta temperatura**

El principal inconveniente de un sistema superconductor es la necesidad de que trabaje dentro de un recipiente a la temperatura del helio líquido, con las limitaciones físicas y económicas que representa. La posibilidad de usar materiales a la temperatura del nitrógeno líquido no elimina los inconvenientes pero los reduce, añadiendo otros como las propiedades mecánicas de estos materiales. Actualmente los superconductores de alta temperatura se usan en forma de barras y cintas de plata rellenas de este material cerámico.

ANTEC ha trabajado en la fabricación de un limitador de corriente en el marco de un *Proyecto Brite Euram* junto con varios laboratorios como el ICMAB (Instituto de Ciencias de Materiales de Barcelona).

**BIBLIOGRAFÍA**

- ITURBE, Rafael, MENDIVIL, Carmelo: *Superconductividad*. DYNA, octubre 1992, Pág. 17-25.
- ITURBE, Rafael *et al.* *Algunos aspectos de la superconductividad de potencia aplicada en España. Superconductividad en España*. Programa MIDAS. Editor Félix Yndurain, 1993. Pág. 287-301.
- GARCIA TABARES, Luis; SIEGEL, Norbert: *Spanish Industries and CERN. Particle World*, Vol. 3, nº 2 (1992). Pág. 92-97.
- *El CERN ensaya los primeros imanes superconductores para el LHC*. DYNA Junio 2000, Pág. 68.
- *La búsqueda afanosa de la violación CP*. DYNA, junio 2000, Pág. 54-57.
- CERN ACCELERATOR SCHOOL (CAS): *Accelerator Physics Course, 1989*.
- CERN ACCELERATOR SCHOOL (CAS): *LHC Conceptual Design, 1995*
- *CERN Courier. Diversos Boletines.* ■



Figura 26: Sextupolos superconductores