

El CERN y su nuevo Acelerador de Partículas



Andrés Rafael de la Calle
Ingeniero Industrial del I.C.A.I.,
especialidad electrónica, prom.
1990

Introducción

En un artículo anterior (ANALES Marzo-Abril 2002) se justificaba la necesidad de construir un nuevo acelerador-colisionador de partículas, junto con los necesarios detectores asociados. El objetivo es confirmar la validez del Modelo Estándar de la composición elemental de la materia o iniciar los caminos de una nueva física de partículas. Este nuevo acelerador debe aumentar la energía cinética de las partículas hasta superar 10 TeV de energía de colisión en el centro de masa ($1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19}$ julios). Se convertirá en el acelerador de partículas de mayores prestaciones de todo el mundo, considerando tanto su energía final como la calidad del haz de partículas.

El proyecto LHC —“Large Hadron Collider”— fue aprobado por el Consejo del CERN —“Centre Européen pour la Recherche Nucleaire”— en Diciembre del año 1994 con un presupuesto de 2.600 millones de Francos Suizos (CHF). Este artículo pretende revisar el proceso de diseño de los parámetros esenciales del acelerador y las implicaciones que de éstos se derivan, desde el punto de vista de la ingeniería de la máquina. Los detectores, enormes sensores electrónicos de diferentes tipos que permiten el registro y posterior análisis de lo que ocurre en cada colisión de haces, no serán abordados en este documento.

La puntuación utilizada para los números es: los decimales se separan por un punto y los miles se marcan con coma.

Topología del acelerador-colisionador

La máquina anterior al LHC, el LEP —“Large Electron Positron”— aceleraba en un único anillo de 27 km de circunferencia, haces de electrones y positrones. El positrón es la antipartícula del electrón. Materia y antimateria son tanto eléctrica como magnéticamente simétricas, por lo que un mismo sistema electromagnético sirve para acelerarlas y guiarlas en sentidos opuestos en el recinto de un anillo único. El LEP trabajaba a 100 GeV. Los colisionadores electrón-positrón

son ideales para estudiar la materia subnuclear. Estas partículas son elementales y carecen de subpartículas. Esto hace que se reduzca el ruido de fondo y que la energía cinética se concentre en las partículas elementales y no se reparta entre subpartículas, tal como ocurre al emplear protones que están compuestos por quarks. Un colisionador $e^+ e^-$ de 1 TeV tendría la misma energía eficaz que un colisionador $p^+ p^-$ de 10 TeV. La Figura 1 muestra el modelo actual de la materia.

Lamentablemente el LEP es el límite para las máquinas circulares $e^+ e^-$ porque las partículas, cuando se les fuerza a seguir una trayectoria circular, emiten la llamada radiación sincrotrón y pierden energía. Esta pérdida de energía es inversamente proporcional a la energía en reposo de la partícula elevado a 4. La energía en reposo de un protón es 2,000 veces la de un electrón (1 GeV contra 0.5 MeV). A 1 TeV, dentro del anillo del LEP, un electrón perdería 28 veces su energía en cada vuelta por lo que el nuevo colisionador deberá utilizar protones. Los aceleradores lineales $e^+ e^-$ constituirían una alternativa válida si fuesen tecnológicamente realizables. Los aceleradores que sucedan al LHC podrían ser de este tipo.

En una máquina circular, la radiación sincrotrón es inversamente proporcional al radio de curvatura del anillo. Pero la opción de construir un túnel nuevo y mayor no es económicamente viable. Sólo queda la opción de utilizar el túnel del LEP.

Usando protones se puede hacer hacer colisionar protones contra antiprotones, topología con anillo único, o protones contra protones, topología con dos anillos. La Figura 2 muestra el corte de un electroimán del LEP —un anillo— y otro del LHC —dos anillos—. La función de estos electroimanes se explicará más adelante.

La opción $p^+ p^-$ no es conveniente puesto que el LHC, además de por su energía de 14 TeV, se caracteriza por la alta luminosidad requerida, que mide la calidad del haz de partículas. La luminosidad es directamente proporcional a las intensidades —en Amperios— de los

haces que colisionan y a la longitud de la zona de interacción. La luminosidad es inversamente proporcional a la sección eficaz de los haces. La luminosidad prevista para el LHC es de $10^{34} \text{ cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$, 1,000 veces superior a la del LEP. Esta luminosidad se puede conseguir en un colisionador $p^+ p^+$, sin embargo, en un colisionador $p^+ p^-$, los antiprotones no permitirían la formación de un haz de tan alta calidad.

A la velocidad de la luz

Los hadrones son partículas sensibles a la fuerza fuerte. Están por tanto compuestos por las partículas elementales que interactúan a través de esta fuerza: los quarks. Los protones son por tanto hadrones. Ahora comprendemos por qué el nuevo acelerador $p^+ p^+$ se denomina "Large Hadron Collider". Se trata por de trabajar con protones a 7 TeV para que la energía disponible en una colisión protón-protón sea de 14 TeV. ¿Cuál es la velocidad de un protón con esta energía cinética? Comparándola con la energía en reposo de un protón –1 GeV– vemos que hay que recurrir a la física relativista donde la masa en reposo de una partícula no es igual a su masa en movimiento.

La energía total W de una partícula se expresa como $W = m \cdot c^2$ y su energía cinética K como $K = W - W_{\text{reposito}}$. La energía en reposo vale $M \cdot c^2$. El impulso se define como $p = m \cdot v$. M es la masa en reposo y m es la masa en movimiento. Estas masas están relacionadas por la expresión

$$m = \frac{M}{s \sqrt{1 - \beta^2}}$$

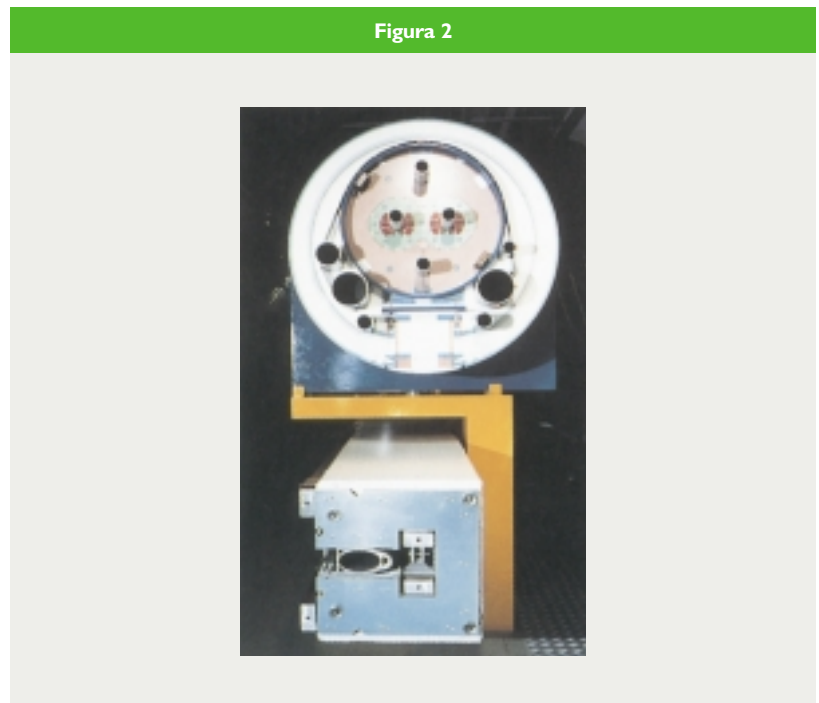
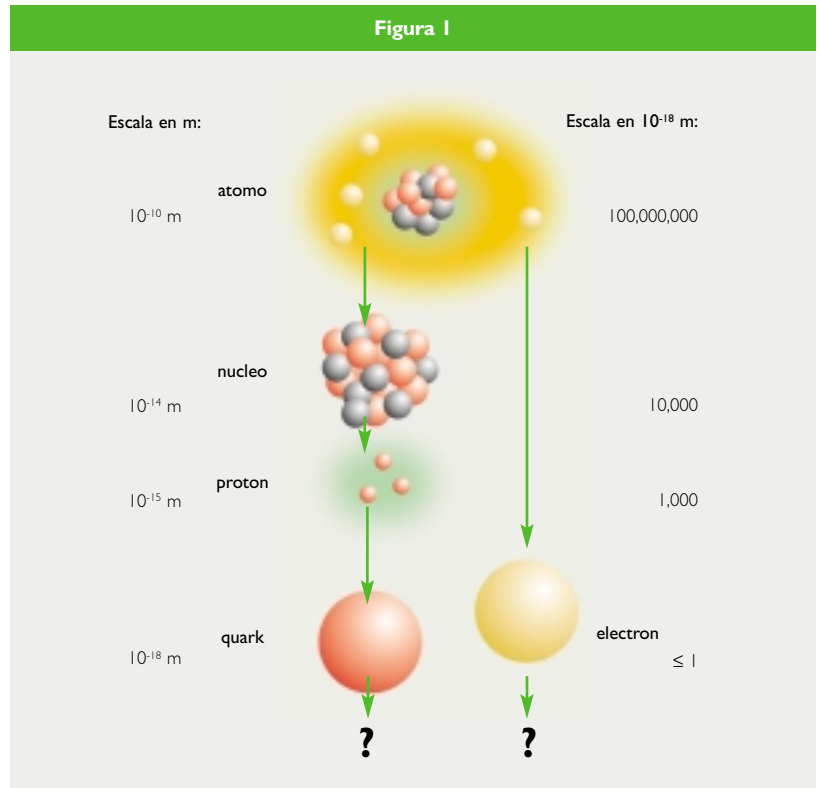
donde $\beta = v/c$ y v la velocidad de la partícula. Finalmente la velocidad y la energía cinética se relacionan a través de la expresión

$$\beta = \sqrt{1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{K}{M \cdot c^2}\right)^2}}$$

Una última relación de utilidad es la que relaciona impulso y energía:

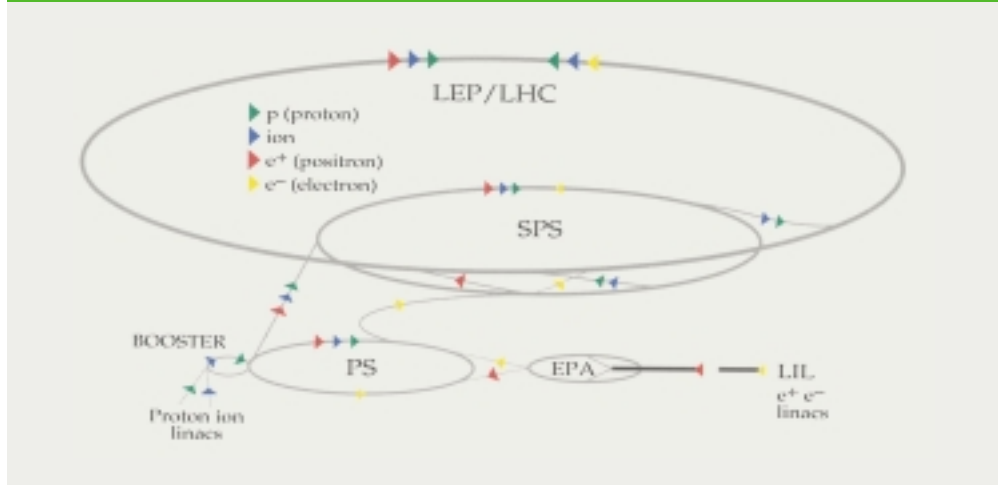
$$(p \cdot c)^2 = W^2 - W_r^2 = K \cdot (K + 2 \cdot W_r)$$

De esta expresión se deduce que la energía cinética debe ser cinco veces superior a la energía en reposo para que la velocidad equivalga al 99% de la velocidad de la luz. La partícula aumenta su energía dentro de un acelerador circular con prácticamente velocidad constante. Lo que aumenta es su impul-



so gracias al aumento de la masa en movimiento. La casi totalidad de la aceleración se produce en la cadena de aceleradores lineales y circulares que preceden a la máquina acelerador-colisionador. La Figura 3 muestra la serie de aceleradores que son necesarios en el caso del LHC. Es un simple problema de rango dinámico: es imposible completar

Figura 3



una aceleración hasta 7 TeV con una sola máquina.

Aumentando la energía ...

Merece la pena recordar la ecuación vectorial del movimiento de una partícula cargada situada dentro de un campo electromagnético:

$$d\vec{p}/dt = q \cdot (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

donde $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$ es el vector impulsión, \vec{v} la velocidad, $m(v)$ la masa en movimiento, q la carga eléctrica (carga unitaria de un protón = $1.6 \cdot 10^{-19}$ culombios), \vec{E} el campo eléctrico y \vec{B} el campo magnético. Desarrollando esta ecuación en el caso de una órbita circular cerrada se obtiene que

$$dp/dt = q \cdot E$$

siendo E un campo eléctrico tangente a la órbita circular de referencia.

Este campo eléctrico es producido en cavidades resonantes alimentadas por amplificadores de radiofrecuencia. ¿Por qué de radiofrecuencia? El campo eléctrico tiene que estar sincronizado en el tiempo con el paso del paquete de partículas que constituyen un haz para estar en fase y no frenarle. En el caso donde $W \gg W_r$, se cumple que v es aproximadamente igual a c : la frecuencia de revolución de las partículas es prácticamente constante e igual a $f = c/2\pi R$, donde R es el radio del acelerador. La frecuencia de aceleración será un múltiplo de f . Este múltiplo es normalmente elevado y limitado por la tecnología disponible. En el LHC, con una circunferencia de 26,658.883 m (tantos decimales dan una idea del nivel al que tienen que trabajar los

topógrafos en el CERN), se ha tomado como múltiplo 35,640 para trabajar a 400 MHz. A mayor frecuencia menor tamaño de las guías de onda y menores pérdidas por efecto piel. Por otro lado, el hecho de trabajar a frecuencias de revolución constantes permite la utilización de sistemas de radio frecuencia optimizados para funcionar a la frecuencia elegida.

... hasta el límite

Intuitivamente comprendemos que tiene que haber un límite al incremento de energía que puede aportar el campo eléctrico disponible. Efectivamente, en el caso donde $W \gg W_r$, la expresión de este límite es sencilla. De nuevo partiendo de la ecuación vectorial del movimiento de una partícula en una órbita circular es posible obtener cuál es la relación entre impulso y campo magnético:

$$p = q \cdot B_m \cdot r$$

donde B_m es el campo magnético medio perpendicular al plano de la órbita y r el radio de curvatura medio. Este campo magnético, generado en los dipolos y creciente con el tiempo según la energía de la partícula aumenta, permite mantenerla dentro de su trayectoria circular.

Usando la fórmula obtenida anteriormente se puede llegar a

$$W^2 = (q \cdot c \cdot B_m \cdot r)^2 + W_r^2$$

si $W \gg W_r$, esta expresión se simplifica hasta

$$W \approx 300 \cdot Q \cdot B_m \cdot r$$

(en MeV si B_m está en Teslas y r en metros) donde Q es el número de cargas unitarias

en la partícula. La energía final en un acelerador circular no depende más que del producto $B_m r$:

En el caso de nuestro ejercicio y tratándose de una máquina $p^+ p^+$, Q vale 1 y r vale 4,242.893 m. Para alcanzar los 7 TeV por haz, el campo magnético medio tiene que ser del orden de 5.5 Teslas. Para alcanzar este valor medio en la órbita y teniendo en cuenta la longitud ocupada por los electroimanes bipolares (en cuyo entrehierro se encuentra el anillo por donde circula el haz), la cifra de trabajo de estos últimos que se obtiene para el LHC es de 8.4 T.

Disposición del acelerador-colisionador

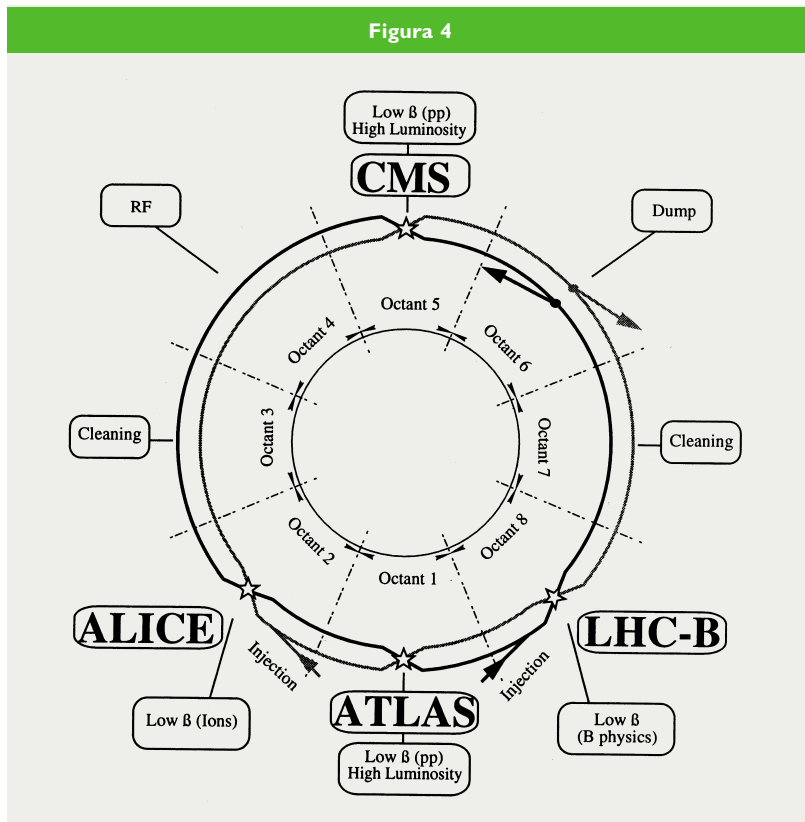
Al heredar el túnel del LEP, el LHC presenta una disposición similar a la de su antecesor. La Figura 4 muestra la colocación de los diferentes elementos. De las ocho secciones rectas disponibles en el centro de cada octante, se emplean sólo cuatro para cruzar cada haz de su anillo al otro y realizar la experimentación. En ellas se instalarán los cuatro detectores del LHC: ATLAS, CMS, ALICE y LHCb. Dos secciones se emplean para realizar la "limpieza" o colimación del halo del haz: retirar las partículas colocadas alrededor del haz para mejorar su calidad. Otra sección contiene los elementos de radiofrecuencia aportadores de energía. La sección restante se dedica a los sistemas de extracción de los haces para ser extinguidos contra blancos masivos.

Los electroimanes del LHC se reparten a lo largo del anillo. Se agrupan en semi células de 53.45 m de longitud. Cada una de ellas contiene 3 dipolos, de 14.3 m de longitud cada uno y con la curvatura correspondiente a la órbita, y una corta sección recta para el cuadrupolo principal, otros electroimanes correctores (ver el apartado siguiente), un sensor de posición del haz y una unidad de conexión criogénica. El número total de dipolos es de 1,232.

La óptica del acelerador

En el apartado anterior se ha mencionado la existencia de electroimanes de cuatro polos. No basta con mantener las partículas en una trayectoria circular gracias a los dipolos. Hay que lograr que el haz sea estable alrededor de la órbita de referencia y que la amplitud de las pequeñas oscilaciones en los ejes perpendiculares a la tangente sean lo menores posibles. A menor envolvente del haz, mayor intensidad y luminosidad y menores dimensiones del tubo que contiene el haz de

Figura 4



partículas. La envolvente del haz es proporcional a la raíz cuadrada de la llamada emitanza del haz.

En realidad el haz oscila también longitudinalmente según el eje tangencial. Hay que limitar estas oscilaciones dado que la eficacia del sistema acelerador de radiofrecuencia se deteriora si la fase entre partícula y campo eléctrico se aleja del ideal.

El estudio de estas oscilaciones degenera rápidamente en ecuaciones muy complicadas. El resultado visible es que una célula del LHC está formada, además de por seis dipolos, por varios electroimanes estabilizadores. Concretamente cada célula tendrá un sextupolo y un cuadrupolo u octupolo dependiendo de la posición de la célula en la máquina. Para comprender más intuitivamente de qué se trata, podemos comparar el flujo magnético de un dipolo y de un cuadrupolo tal y como parecen en las Figuras 5 y 6 respectivamente. El primero genera un campo magnético vertical mientras que en el segundo los campos magnéticos presentes son verticales y transversales con signos opuestos, creando una jaula magnética que contiene el haz en el centro del tubo. Hay que recordar que cada haz está compuesto por partículas del mismo signo eléctrico y no les agrada apretujarse en exceso. Como pode-

Figura 5

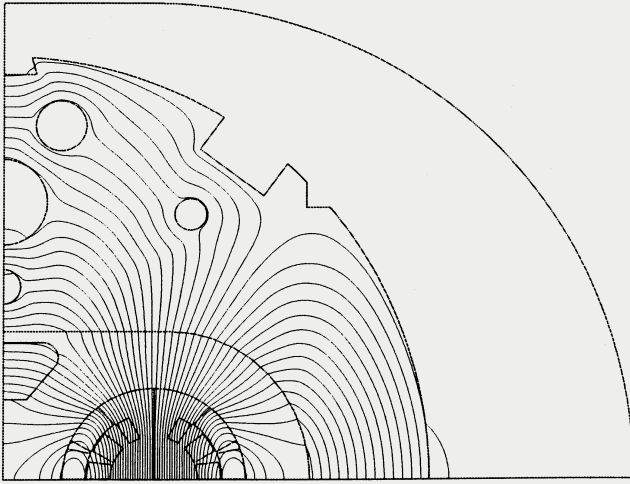
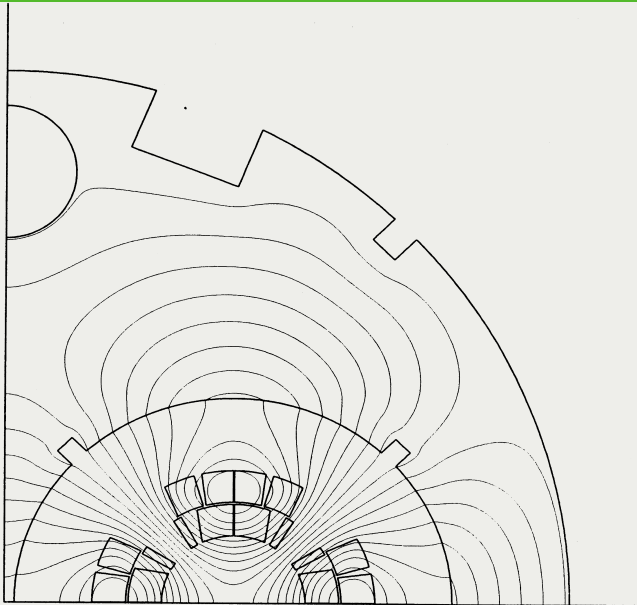


Figura 6



mos imaginarnos, la óptica se complica en las áreas donde se realizan las inserciones para la colisión con el fin de optimizar la luminosidad en el momento del choque.

Los electroimanes superconductores

Afortunadamente para los ingenieros, los físicos suelen soltar de vez en cuando cifras como la mencionada anteriormente: 8.4 Teslas de campo magnético necesario en el entrehierro de los dipolos. Ahora comprobamos por qué interesa minimizar la emitancia del haz: entre otras razones para reducir el entrehierro de los electroimanes. Para alcanzar la fuerza

magnetomotriz requerida son necesarios más de 10,000 A, y sólo es posible hacer circular tanta corriente por un bobinado de reducidas dimensiones empleando cables superconductores. Concretamente cables compuestos de cobre revestido de una aleación NbTi inmersos en un baño de helio super fluido a 1.9 Kelvin. En resumen: 8.4 T a 1.9 K. ¿Podrá el campo magnético soportar esta temperatura?

Lo cierto es que los dipolos del LHC presentan las siguientes novedades:

- Utiliza helio super fluido (1.9 K). Gracias a su viscosidad nula, que le permite infiltrarse a través del aislamiento del bobinado, y a su elevadísima conductividad térmica podrá contribuir a retirar el calor de las bobinas. Esto es importante para evitar la aparición de puntos calientes dentro del bobinado debidos a fricciones mecánicas originadas por las variaciones del campo magnético. Estos puntos calientes pueden iniciar una reacción en cadena que llevaría al "apagado" del imán sacándole de su estado frío.
- Topología dos-en-uno. Para bajar los costos y reducir el volumen ocupado en el túnel, los dos anillos por donde circulan los haces comparten el mismo núcleo de hierro y criostato.
- La presencia de dos bobinados dentro del mismo núcleo produce una elevada fuerza horizontal (340 t/m) que reventaría el imán si las bobinas no estuviesen retenidas por un collar de aluminio.
- Núcleo de hierro a base de laminas verticales.

Obsérvense las Figuras 7 y 8 que muestran la sección del dipolo al completo y una vista longitudinal del mismo.

Protección de los electroimanes superconductores

Anteriormente se mencionó cómo la aparición de un punto caliente dentro del electroimán superconductor puede llegar a apagarlo por completo. Peor aún, en un conjunto de electroimanes conectados en serie, la energía almacenada en los demás se vuelca sobre el que ha sufrido el apagado, destruyéndolo. Para evitar este incidente se cortocircuita el imán afectado con diodos superconductores a 1.9 K y se desexcita a los demás de la serie. Estos diodos pueden absorber 1.5 MJ de energía.

La alta densidad de energía dentro de los electroimanes y la lenta velocidad de propagación del apagado a partir del punto caliente plantean el problema del deterioro del electroimán debido a su propia energía.

Figura 7

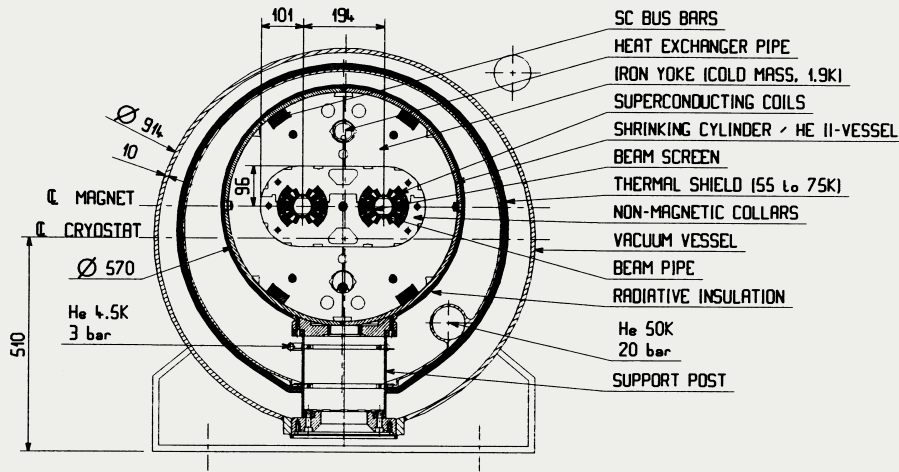
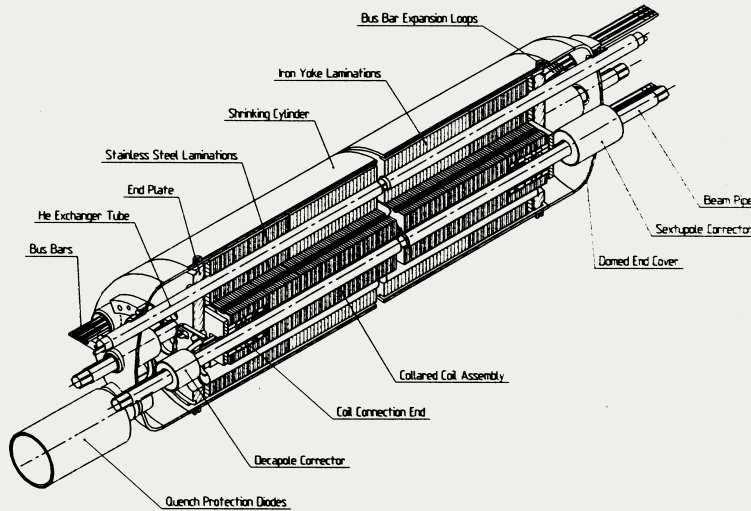


Figura 8



La aparición de un punto caliente debe ser detectada rápidamente para disparar la acción de calentadores colocados a lo largo del electroimán. Estos calentadores van a propagar el apagado a todo el volumen del electroimán.

La refrigeración criogénica

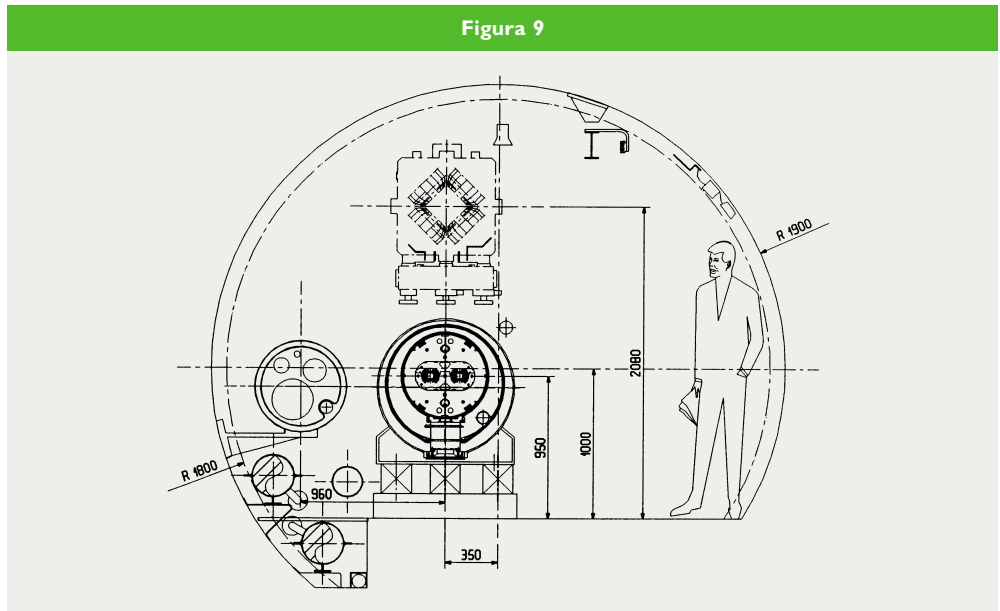
El sistema criogénico del LHC tendrá que hacer frente a 25 km de electroimanes de diferentes tipos trabajando a 1.9 K, por lo que se convertirá en la instalación criogénica más grande del mundo. Los electroimanes del LHC trabajarán en un baño estático de helio super fluido a 1.9 K y 1 bar. La refrigeración se realiza a través de un intercambiador de calor por el que circula un flujo de helio super fluido y saturado a 15 mbar.

Por otro lado el sistema tendrá que disponer de una capacidad total de evacuación de

20 kW a 1.8 K, repartida en ocho criostatos situados a lo largo de la máquina. Estos parámetros no tienen precedentes. Este calor a evacuar se origina principalmente en la pérdida de energía del haz que éste sufre al verse obligado a seguir una trayectoria no rectilínea (radiación sincrotrón).

Para reducir el coste termodinámico de una refrigeración a tan baja temperatura, la mayoría del calor a evacuar es bloqueado a mayores temperaturas. Para aislar la "masa fría" a 1.9 K del tubo del haz, que se calienta por la radiación sincrotrón, existe una pantalla térmica interior a 5-10 K. Para bloquear el calor que viene del exterior, otra pantalla térmica a 50-70 K envuelve toda la masa fría. La Figura 7 muestra estas dos pantallas, la primera pantalla lleva la leyenda "Beam screen" y la segunda "Thermal Shield".

Figura 9



El sistema criogénico tiene que distribuir helio a estas diferentes temperaturas. La Figura 9 muestra la sección del túnel del LHC con un dipolo, el sistema de distribución criogénica y el jefe de proyecto, este último sin seccionar. El electroimán clásico que parece volar en mitad el túnel sólo nos da una idea del espacio disponible para una posible reinstalación del LEP sobre el LHC.

El sistema de vacío

Los tubos por donde circulan los haces de partículas tienen que estar a un vacío muy elevado (10^{-10} Torr) para evitar los choques de las partículas del haz contra moléculas presentes en el tubo. Sin un sistema de vacío tan profundo como éste no sería posible hacer funcionar los aceleradores con la adecuada luminosidad. El objetivo es mantener la luminosidad del haz dentro de los niveles definidos durante un tiempo adecuado con relación al tiempo de llenado de la máquina. El LHC necesitará dos horas de llenado y los haces mantendrán una luminosidad correcta durante siete horas. Volviendo a la emitancia, cuanto menor sea ésta, menores serán las dimensiones del tubo, menor será el volumen a vaciar y mayor al ahorro en tiempo y energía.

El sistema de radiofrecuencia

La frecuencia adoptada, 400.8 MHz con un rango de ajuste de 10 kHz , es la máxima compatible con la longitud de los paquetes de partículas que serán inyectados en el LHC desde los aceleradores previos. La tensión de operación podrá alcanzar los 2 MV en cada cavidad, dando así lugar a un gradiente acele-

rador de 485 keV/vuelta . Las cavidades en las que el campo eléctrico se encuentra con las partículas a acelerar utilizan también, como los electroimanes, la superconductividad para reducir las pérdidas resistivas por efecto piel. Están construidas en cobre recubierto por una fina película de niobio. El componente más crítico es sin embargo el acoplador de radiofrecuencia que transmite la potencia, 180 kW , del amplificador hasta la cavidad resonante. La Figura 10 muestra el corte de una de estas cavidades para "ayudarnos" a entender lo que está ocurriendo en su interior:

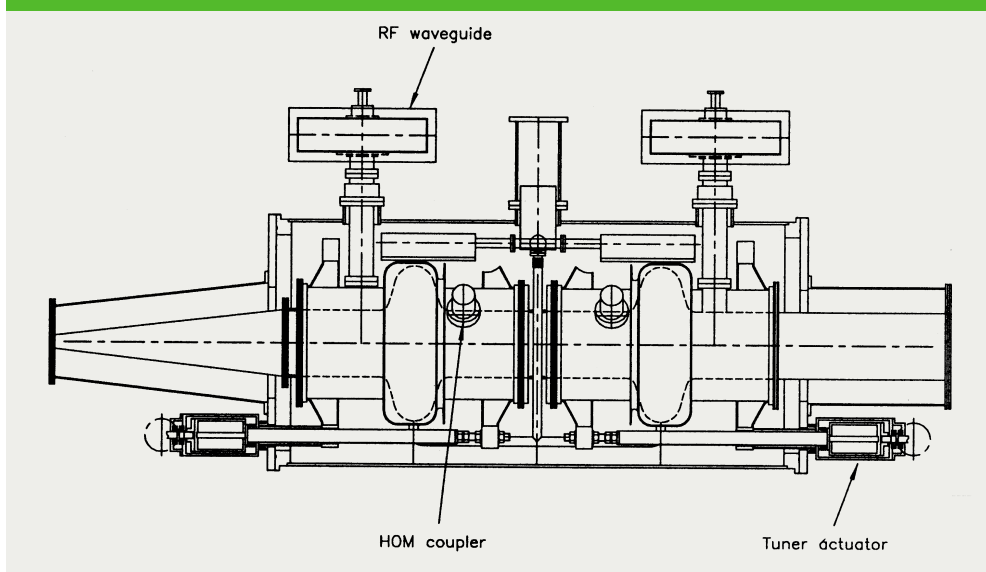
Lo que se queda en el tintero

Las prestaciones del LHC se resumen en su energía y luminosidad. De hecho estos dos parámetros dividen el proceso de diseño en dos. De la elevada energía en un anillo de radio dado se ha deducido el campo magnético necesario y de éste la necesidad de usar electroimanes superconductores y un complejo sistema criogénico y de protección. Los ingenieros suelen centrarse en los problemas que supone ir trepando por esta rama del diseño. Como somos muy listos, hemos preferido dejar para los físicos la otra rama, aquella que nace en el requisito de una alta luminosidad. La primera rama sería como la ingeniería del acelerador y la segunda la física de la máquina. A continuación se revisan los puntos críticos de la física del acelerador que afectan a su luminosidad y por tanto a su diseño.

Interacciones entre haces

Esta interacción de efectos no lineales es inevitable cuando se aproximan dos haces

Figura 10



de partículas hacia la zona de colisión. El campo electromagnético de un haz modifica la trayectoria de las partículas del otro haz haciéndolo oscilar y reduciendo así su vida media por colisión contra las paredes del anillo. Una óptica especial es necesaria en los puntos de colisión.

Dispersión del haz

Originada por las fuerzas de repulsión entre cargas de un mismo signo eléctrico. Hace aumentar la emitancia y para contrarrestarlo se hace aumentar artificialmente las oscilaciones longitudinales, lo que va a limitar la máxima tensión de radiofrecuencia aplicable.

Apertura dinámica

Se define así a la máxima amplitud de oscilación del haz en presencia de perturbaciones no lineales. La segunda fuente de perturbaciones no lineales son los errores de campo magnético en los electroimanes. Para minimizar la apertura dinámica se realizan simulaciones para detectar efectos no lineales que aparecen sistemáticamente. Estos podrán ser parcialmente corregidos con la adición de pequeños electroimanes de corrección.

La situación actual

En los últimos meses la atención se ha desplazado de los problemas técnicos a los financieros. Desde un punto de vista técnico, el montaje y funcionamiento correcto de una semi-célula del LHC, montada con elementos de pre-serie, en Junio del año pasado corrobora la posibilidad de cumplir con

lo planificado: la puesta en funcionamiento del acelerador en el año 2006.

Sin embargo, los problemas presupuestarios podrían hacer modificar esta perspectiva. A un sobrecosto de 480 millones de CHF (19%) –cuyo principal componente es el sobreprecio de los electroimanes superconductores– sobre el presupuesto original de 2.600 millones de CHF hay que añadir los costes no incluidos en el presupuesto inicial y que deben ser absorbidos por el presupuesto anual del CERN. Estos costes no previstos provienen del desarrollo de los electroimanes superconductores (150 millones de CHF), de la necesaria y novedosa infraestructura informática denominada GRID (120 millones de CHF) y de un agujero de 50 millones de CHF debido a que las contribuciones de los países no miembros no alcanzó lo esperado.

La negativa de los países miembros a aumentar su contribución para financiar estos 800 millones de CHF obliga al CERN a reducir su programa científico al mínimo para poder construir el LHC. Si esto no fuese suficiente, el único grado de libertad disponible sería el tiempo. Pero retrasar la operación del LHC tendría un gran coste desde el punto de vista científico: el LEP dejó de funcionar a finales del 2000 y más de seis años sin física de primer nivel supondría una gran pérdida de prestigio y de investigadores. Esperemos que el programa pueda seguir como estaba previsto y que el CERN pueda establecerse como el más importante laboratorio en física de partículas. Más información sobre las características y la evolución de este proyecto en <http://www.cern.ch>. ■