

# Cálculos sencillos para la máquina más compleja. Aprendiendo física en la Secundaria desde el LHC (CERN)

Ramón Cid Manzano

*Teachers usually mention CERN in Secondary School only because of the big size of the accelerators and detectors used there, the large number of scientists involved in their activities and on account of the necessary international scientific collaboration. Impressive pictures of the accelerators and detectors are also shown. This way is correct but clearly incomplete since there are other didactic possibilities to talk about one of the most important scientific institutions in the world. It's the aim of this paper to introduce some simple physical calculations about some phenomena which took place in old accelerators and will be present when LHC starts working in 2007. They can be used in the classroom in order to stimulate the curiosity of students, to help them to understand those physical concepts, and as an example of the relationship between the cold equations of Physics on the blackboard and the exciting work in scientific research.*

## 1. Introducción

Es habitual que en los libros de texto de Física en la Secundaria aparezcan fotos o referencias al CERN para destacar la grandeza de los aparatos que se utilizan, la gran cantidad de científicos que trabajan en sus experimentos, la colaboración internacional y, naturalmente, que se trata de investigar sobre lo más profundo de la naturaleza.

Con ser importantes todas estas indicaciones, acaban quedando reducidas casi a anécdota, pues no se suele ir más allá. Es propósito de este artículo presentar algunos cálculos sencillos que puedan ser utilizados en distintos momentos del currículo en la Física de Secundaria, con el fin de acercar de forma más directa al profesorado y alumnado a esa importante institución que a partir de 2007 se va a convertir en el centro de la Física de Partículas en el mundo, con la puesta en marcha del LHC (Large Hadron Collider - Gran Colisionador de Hadrones).

Pero además, se pretende que los profesores y profesoras de Física en Secundaria encuentren aquí un recurso para abordar ciertos tópicos de la física moderna y también otros de la física clásica que raramente se vinculan con la investigación actual en la Física de Partículas. En cualquier caso, la intención es ayudar a que el profesorado se implique en el conocimiento y en la docencia de una parte de la Física tan importante y actual, y sobre la que nuestro alumnado tiene, además, el derecho a estar informado.

La ONU ha elegido el año 2005 como Año Internacional de la Física, y los profesores de esta materia en los cursos preuniversitarios estamos obligados más que nunca a acercar la Física actual a nuestros alumnos. Quizás así podamos luchar mejor contra el injusto tratamiento sufrido por nuestra asignatura en el currículo de la enseñanza secundaria en los últimos años.

Además, ningún profesor de Física –sea del nivel que sea– debe quedar al margen de uno de los hitos científico-tecnológico más importantes de la historia de la humanidad. Recuérdese que el Nobel 2003 de Física fue concedido por estudios sobre superconductividad –que tanto protagonismo adquiere en el LHC– y el Nobel 2004 ha premiado los esfuerzos llevados a cabo para comprender el comporta-

miento de los quarks, sobre el que el LHC tendrá tanto que decir.

En la bibliografía se señalan excelentes aportaciones sobre estos temas en el contexto de las enseñanzas medias. Libros, artículos y Webs que con un enfoque básicamente divulgativo son especialmente interesantes para el profesorado de Física en Secundaria. En particular, deseo resaltar los excelentes artículos publicados en los últimos años en esta revista por Manuel Aguilar y Francisco J. Yndurain, siendo clara muestra de ello los aparecidos en el Vol. 18 - Nº 4 de 2004. En ellos se encuentra información abundante sobre la Física de Partículas en general y sobre el LHC en particular.

Se entenderá en este artículo que el lector o lectora ya conoce de forma cualitativa los aspectos más generales de lo que es un acelerador de partículas. No obstante, en las sucesivas secciones se irán introduciendo los detalles básicos del funcionamiento del LHC y algunos de sus parámetros característicos.

## Algo de cinemática

El LHC es un perfecto ejemplo para estudiar algunas magnitudes relacionadas con el movimiento circular. Me parece un ejemplo mucho más motivador que el del movimiento de una noria o el de la rueda de un coche.

Como es sabido, en los grandes aceleradores las partículas alcanzan prácticamente la velocidad de la luz y podremos tomar ese dato como previo a cualquier otro cálculo. No obstante, es posible –para el último nivel de secundaria– introducirnos un poco en la Relatividad Especial y hallar un valor para esa velocidad. Veremos esto en una sección posterior.

En el LHC, dos haces de protones giran en sentido contrario en sendos tubos de vacío. La trayectoria de los protones es una circunferencia de 26659 metros, y por tanto el radio de la misma es de 4243 m.

En su movimiento circular, cada protón sufrirá una aceleración centrípeta que podemos obtener así,

$$a = c^2/r \rightarrow a = (299792,5 \cdot 10^3)^2 / (4243) \rightarrow a = 2,12 \cdot 10^{13} \text{ m/s}^2$$

lo que supone unos 2 billones de veces el valor de la aceleración de la gravedad en la superficie terrestre.

Además, cada protón dará en un segundo un número de vueltas de  $(299792,5 \cdot 10^3)/(26659) \approx 11245$  vueltas y por tanto la frecuencia del movimiento es de  $f = 11,245$  kHz

Este valor, llamado Frecuencia de Revolución es un parámetro característico del LHC que fácilmente hemos calculado.

El período del movimiento será,  $T = 1/f \rightarrow T = 8,9 \cdot 10^{-5}$  s.

Se pueden hacer ahora comparaciones con otros movimientos cercanos a los alumnos y se comprenderá la magnitud de los valores que se acaban de obtener.

Los dos haces están formados por paquetes o grupos de  $1,05 \cdot 10^{11}$  protones de unos 7,7 cm de longitud y 16 micrones de sección, estando separados los grupos entre sí por una distancia de 7,48 m. Podemos calcular el llamado tiempo entre grupos que es otra característica fundamental de un acelerador,

$$\text{tiempo} = \text{espacio/velocidad} \rightarrow t = 7,48 / 3 \cdot 10^8 = 24,95 \cdot 10^{-9} \rightarrow t \approx 25 \text{ ns}$$

Podemos también hallar el número de grupos que debería de haber en cada haz,

$$26659 / 7,48 \approx 3560 \text{ grupos}$$

No obstante, existen dentro de cada grupo repulsiones eléctricas entre los protones, y también entre grupos. La gran cantidad de dispositivos electromagnéticos existentes en los 27 km del acelerador con sus inevitables imperfecciones provocan también inestabilidades en los dos haces, a pesar de centenares de sistemas correctores presentes. Además, en los detectores cada paquete genera en el del haz opuesto alteraciones al cruzarse con él. Por ello algunos grupos van perdiendo "calidad", así que deberán ser evacuados y sustituidos por otros nuevos. Para facilitar la entrada de los nuevos es necesario que una parte de los 3560 grupos estén en realidad "vacíos". Así que el número de grupos con protones que se ha establecido como más adecuado es de 2835.

El número total de protones en cada haz será de,

$$N = 2835 \cdot 1,05 \cdot 10^{11} = 3 \cdot 10^{14} \text{ protones}$$

En los dos haces tendremos, pues, 600 billones de protones. En términos de masa en reposo,

$$6 \cdot 10^{14} \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} = 10^{-12} \text{ kg} = 1 \text{ ng (1 nanogramo)}$$

Otro ejercicio interesante es calcular en cuantas vueltas los protones "caerían" en la parte inferior del tubo de vacío en que viajan, por efecto gravitatorio. A la vez que cada protón describe su trayectoria circular es afectado por la gravedad de forma que sufre un movimiento vertical de caída de:

$$h = 1/2g \cdot t^2 \rightarrow t = (2h/g)^{1/2}$$

$h$  es el radio del tubo (28 mm), así que:  $t = (2 \cdot 0,028/9,81)^{1/2} \rightarrow t \approx 76 \text{ ms}$ .

Dividiendo entre el período,

$$n^\circ \text{ de vueltas} = 76 \cdot 10^{-3} / 8,9 \cdot 10^{-5} \rightarrow n \approx 850 \text{ vueltas}$$

Por tanto, además de corregir las alteraciones electromagnéticas citadas en un párrafo anterior, se hace también necesario corregir estas desviaciones de origen gravitatorio. Incluso en el LHC se tendrán en cuenta variaciones gravitatorias tales como las causadas por los cambios de caudal del cercano lago Lemán.

Veremos más adelante como se puede corregir la trayectoria de los protones.

Como se acaba de ver, los cálculos no son complicados para el nivel de secundaria y los órdenes de magnitud son tan singulares que pueden dar mucho juego en el aula.

### Sigamos con la dinámica

En el LHC, cada protón es llevado hasta una energía de 7 billones de electrón-voltio (7 TeV). Pero para que los protones presenten esa trayectoria circular deben estar sometidos a una fuerza centrípeta permanente. Se trata de la Fuerza de Lorentz causada por un conjunto de 1232 dipolos magnéticos que se distribuyen por todo el acelerador. En una sección posterior abordaremos el tema del campo magnético.

Calculemos ahora la fuerza centrípeta necesaria:

$$F_c = mc^2/r$$

Como  $E = mc^2$ ,

$$F_c = E/r \rightarrow F_c = 7 \text{ TeV}/4243 \text{ m} \rightarrow F_c = 1,12 \cdot 10^{-6} \text{ J} / 4243 \text{ m}$$

$$F_c = 2,64 \cdot 10^{-10} \text{ N} \text{ sobre cada protón}$$

Pero el cuerpo del acelerador sufrirá la misma fuerza pero de sentido contrario (acción-reacción). Recuérdese que tenemos dos haces de protones, con 2835 paquetes en cada uno, girando en sentidos contrarios sometidos a la misma fuerza centrípeta. La fuerza total de reacción sobre el acelerador será,

$$F_T = 2 \cdot 2835 \cdot 1,05 \cdot 10^{11} \cdot 2,64 \cdot 10^{-10} \\ F_T = 157000 \text{ N}$$

O si queremos expresarlo en términos de ingeniería, la fuerza de reacción sobre el acelerador es de 16 toneladas. Como se puede entender, se trata de una fuerza nada despreciable, sobre todo teniendo en cuenta que los experimentos mantendrán el acelerador funcionando ininterrumpidamente muchas horas cada día, y se espera trabajar durante años, siendo la precisión requerida altísima.

Pero lo más extraordinario es que esa fuerza de 16 toneladas estará causada por 600 billones de protones que apenas suponen 1 ng (un nanogramo!) de masa en reposo.

### Las colisiones. La conservación del momento lineal

La razón de ser de los aceleradores de partículas es que éstas alcancen la mayor velocidad posible para que al colisionar con otras partículas se tenga en el impacto la mayor cantidad de energía disponible. Así serán creadas nuevas partículas y podrá ser comprobada la bondad de las teorías utilizadas.

Mediante campos eléctricos oscilantes, partículas cargadas (electrones, positrones, protones, antiprotones, iones diversos) van ganando velocidad progresivamente.

En el caso de los aceleradores lineales, el proceso se realiza en tubos de vacío con una longitud que varía de unos pocos metros hasta unos cuantos kilómetros, haciendo que el haz de partículas cargadas choque contra un blanco fijo o bien que dos haces acelerados en sendos tubos paralelos sean desviados finalmente para hacerlos colisionar uno contra el otro.

En los aceleradores circulares, las partículas cargadas son inyectadas desde otros aceleradores, separadas en dos haces que circulan por sendos tubos de vacío en sentidos opuestos hasta hacerlos colisionar en las zonas apropiadas del acelerador. Así en el LEP (Large Electron Positron), que ocupó el

túnel de 27 km del Cern hasta el año 2000, los haces antagonistas tenían carga contraria (haces de electrones y haces de positrones). En el LHC, además de los dos haces de protones, también serán utilizados iones (Pb, Sn, Ar, Kr, O) como haces colisionantes en otros experimentos.

Hay muchas diferencias, de todo tipo, entre los aceleradores lineales y circulares, pero básicamente podemos indicar tres. La primera es que en el caso de los aceleradores circulares el suministro final de energía a las partículas se hace progresivamente en cada vuelta, mientras que en los lineales se requieren grandes distancias en línea recta para alcanzar la misma energía.

Una segunda diferencia es que los haces colisionantes en un acelerador circular poseen momentos lineales iguales en módulo pero opuestos vectorialmente. En el momento del choque entre dos partículas el momento total es aproximadamente nulo y por tanto toda la energía antes de la colisión queda a disposición de dar lugar a nuevas partículas de gran masa.

Sin embargo, la conservación del momento lineal hace que en el caso de los aceleradores lineales, que hacen colisionar el haz de partículas contra un blanco fijo, una parte de la energía “almacenada” por las partículas al ser aceleradas, deba ser usada como energía cinética por las partículas que se crean después de la colisión. Es decir, el momento lineal después del choque no puede ser nulo, por lo que una porción de la energía conseguida no puede ser convertida en masa.

La tercera diferencia tiene que ver con la radiación sincrotrón. Las partículas con carga eléctrica emiten permanentemente energía llamada radiación sincrotrón debida a la curvatura de su trayectoria producida por la acción de un campo magnético perpendicular a su velocidad. Recuerde el lector o lectora, que a fin de cuentas esta era la energía que debería emitir de forma constante el electrón en su movimiento curvo alrededor del núcleo en el modelo de Rutherford y que implicaría el colapso del átomo.

La energía sincrotrón depende directamente de la energía de las partículas aceleradas y del campo magnético aplicado, e inversamente de su masa. En el caso del LHC (con protones acelerados hasta 7 TeV) la potencia total perdida es del orden de 4 kW, que es muy pequeña en la escala de energías totales que estarán presentes, y será “fácilmente” compensada por el acelerador. No obstante, hay que tenerla muy presente dadas las condiciones de criogenia que deberán existir en la instalación.

En futuros aceleradores circulares, con protones de hasta 100 TeV, la potencia emitida por este tipo de radiación sería mucho más importante y constituirá un importante problema.

Esta pérdida de energía obviamente no ocurre en los aceleradores lineales, y cuando entren en funcionamiento los proyectos CLIC en el Cern, TESLA en Alemania y NLC en EEUU, mediante los que será posible enfrentar electrones y positrones de dos haces provenientes de sendos aceleradores lineales, tendremos evitado el problema de la radiación sincrotrón y además la energía en la colisión estará totalmente disponible para crear nuevas partículas. Estos serán los aceleradores que estarán funcionando a medio plazo, y seguramente compartirán protagonismo en pocos años con el LHC. Durante las colisiones la ecuación de Einstein,  $E = m \cdot c^2$ , jugará un papel estelar.

En efecto, en su progresiva aceleración, las partículas van incrementando su energía total (energía en reposo más energía cinética), de forma que en el momento del choque de dos partículas, la energía disponible es enorme y en principio toda ella puede convertirse en nuevas partículas de gran masa.

Naturalmente, esas partículas masivas inestables se desintegran de inmediato en otras varias de menor masa, algunas de las cuales también se desintegrarán en otras formando “chorros” de partículas (jets) que deberán ser detectados y estudiados. Se podrá así comparar previsiones de la teoría con la realidad de los experimentos.

En el estudio de la cadena subsiguiente de procesos después de la colisión juega de nuevo un gran papel la conservación del momento lineal. Es usual que en los libros de texto se usen patinadores, bolas de billar, fusiles que disparan, cohetes a reacción, etc., para ejemplificar este principio de conservación. Sin embargo, la Física de Partículas lo lleva usando desde sus inicios y no representa especiales dificultades usar ejemplos de choques entre partículas en aceleradores para aproximarse a este tópico.

Así en la imagen, que recrea las trayectorias de partículas generadas después de una colisión con momento total nulo, se puede apreciar la conservación del momento lineal. Las partículas emergentes y los chorros subsiguientes salen en sentidos opuestos de forma que el momento total después de la colisión es también nulo.

En particular, la imagen que aparece es una de las esperadas en el detector CMS del LHC, y que significaría la detección de una de las partículas más buscadas: el bosón de Higgs (al final del artículo se hablará brevemente de esta partícula).

Son muchas las imágenes de este tipo que se pueden encontrar en Internet, y también son de gran utilidad las imágenes de los “viejos” detectores donde se registraban hasta hace unos 25 años las colisiones entre partículas.

## La detección

Como ya se ha indicado, en el LHC habrá 300 billones de protones en cada haz agrupados en 2835 paquetes, que dan 11245 vueltas cada segundo.

Por lo tanto, 2835 grupos de protones se cruzarán en los detectores con otros 2835 grupos de protones 11245 veces por segundo,

$$2835 \cdot 11245 \cong 32 \text{ millones de encuentros/segundo}$$

Si consideramos los 3560 grupos “totales” que forman cada haz,

$$3560 \cdot 11245 \cong 40 \text{ millones de encuentros/segundo}$$

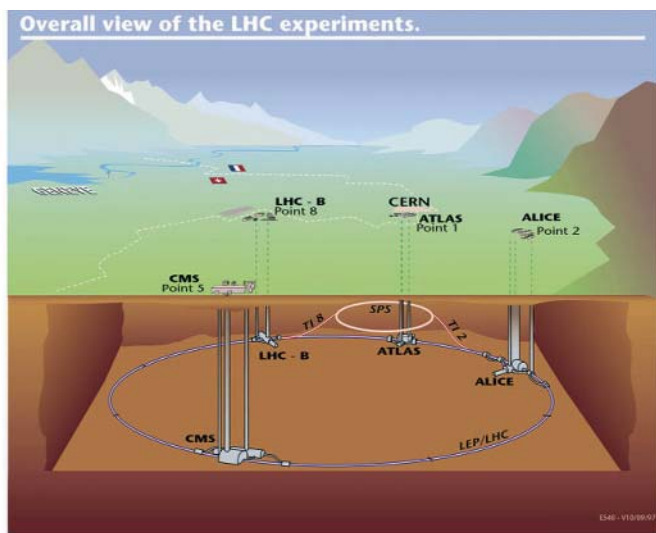
que se puede escribir como, Frecuencia de cruce = 40 MHz

Se esperan una veintena de colisiones por encuentro, así que en total estaremos hablando del orden de 800 millones de interacciones por segundo.

Esta alto número de interacciones es necesario para buscar fenómenos raros e interesantes y se suele expresar a través de una magnitud que es otro de los parámetros fundamentales de un acelerador: la Luminosidad.

Por una parte, el número de colisiones va a depender del cuadrado del número de protones que hay en cada paquete ( $N^2$ ), pues cada protón de un grupo puede interactuar con





Esquema general de los experimentos en el LHC.

cualquiera del otro. Pero como no todos los paquetes llevan protones, deberemos considerar el factor de paquetes útiles ( $f$ ). Para expresar el número de colisiones por segundo, tendremos que considerar el tiempo entre grupos consecutivos que van llegando al detector. Ya lo hallamos en una sección anterior y es de 25 ns. Finalmente, para indicar las interacciones por unidad de superficie consideraremos un área de colisión ( $S$ ) con un diámetro de 16 micrones, que es la sección transversal de cada paquete de protones.

Los datos que necesitamos son,

$$\begin{aligned} N^2 &= (1,05 \cdot 10^{11})^2 \\ f &= 2835/3560 = 0,8 \\ t &= 25 \cdot 10^{-9} \text{ s} \\ S &= \pi \cdot (8 \cdot 10^{-4})^2 \text{ cm}^2 \\ \text{Luminosidad} &= (N^2 \cdot f)/(t \cdot S) \\ L &\sim 10^{34} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \end{aligned}$$

Hay formas más elaboradas para calcular este parámetro, pero para el propósito que nos ocupa la aproximación que se acaba de presentar es suficiente. Este valor de Luminosidad vendría a decir que con las condiciones de trabajo del LHC sería posible alcanzar en los detectores  $10^{34}$  colisiones por segundo y por centímetro cuadrado de sección transversal de colisión.

Ahora bien, para saber las posibilidades de que un determinado suceso ocurra deberemos multiplicar la Luminosidad por la llamada Sección Eficaz ( $\sigma$ ) del evento. Este valor es una forma de expresar la probabilidad de que ocurra ese evento. Se mide en "barn" siendo  $1 \text{ b} = 10^{-24} \text{ cm}^2$ .

El "Número de eventos por segundo" esperados de un determinado evento vendrá dado por,

$$N_{ev}/s = L \cdot \sigma$$

Por esto es tan importante la Luminosidad. En el LHC este valor es cien veces la que había en el LEP o en el actual Tevatron del Fermilab en EEUU. Por tanto estamos multiplicando por cien la probabilidad de que un evento ocurra en comparación con los otros aceleradores.

Así por ejemplo, la sección eficaz para obtener en un choque protón-protón un bosón de Higgs de 100 GeV es de 50 fb (femto-barn),

$$\begin{aligned} N_{ev}/s &= L \cdot \sigma \rightarrow N_{ev}/s = 10^{34} \cdot (50 \cdot 10^{-15} \cdot 10^{-24}) \rightarrow \\ &\rightarrow N_{ev}/s = 5 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1} \end{aligned}$$

Por tanto, hay  $5 \cdot 10^{-4}$  posibilidades por segundo de que el suceso ocurra. De forma quizás más comprensible, si calculamos el inverso de esa cantidad tendremos el tiempo necesario para que se produzca,

$$t = 1/(5 \cdot 10^{-4}) = 2000 \text{ s} \rightarrow t = 33 \text{ minutos}$$

Así que en 33 minutos de funcionamiento del LHC debería crearse ese bosón de Higgs. No parece que haya que esperar mucho tiempo. Ahora bien, el problema es que en 33 minutos se van a producir miles de millones de colisiones en los detectores. Dispositivos electrónicos y procesadores tendrán que reducir ese enorme número a unas decenas de sucesos candidatos.

No se le escapa a quien considere estas cifras que estamos hablando de una muy sofisticada tecnología informática, que debe estar al acecho de un auténtico vendaval de datos. Téngase en cuenta, que aún no habrán abandonado el detector determinadas partículas generadas en un choque, cuando las procedentes de la siguiente colisión –unos nanosegundos después– ya están entrando en él.

Si la World Wide Web nació en el CERN hace más de un decenio como respuesta a las necesidades de comunicación entre los científicos, parece que las nuevas tecnologías de la comunicación y análisis de datos que se están preparando para ser usadas en los detectores del LHC, marcarán el futuro del trabajo por ordenador en el segundo decenio del presente siglo. Unos 6000 científicos trabajarán en todo el mundo en los experimentos del LHC, y para analizar todos los datos obtenidos será necesario el funcionamiento equivalente a 100000 de los más rápidos procesadores actuales en todo el mundo, en lo que se conoce como la LHC Computing Grid (LCG). El volumen del trabajo informático puede ser entendido con una de las comparaciones más citadas a este respecto: la información almacenada durante un año en un experimento –una vez filtrada y comprimida– necesitaría una torre de CDs actuales apilados hasta una altura de 20 km.

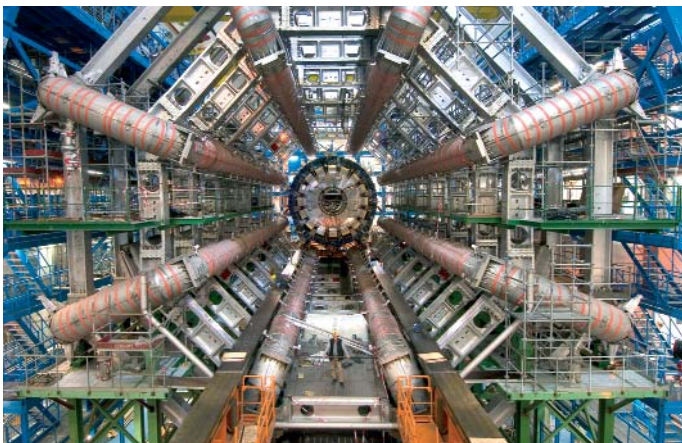
Así como la World Wide Web está ya de lleno presente en nuestras vidas no hay duda que la LCG lo estará en pocos años también.

Cuatro detectores están siendo construidos para el LHC. Dos de ellos son de propósito general: CMS y ATLAS. En ellos se llevarán adelante experimentos que intentarán explicar cómo adquieren su masa las partículas, si existen las llamadas partículas supersimétricas, o por qué hay tres familias de partículas y si pudiera haber más. Otro detector es ALICE, que detectará el resultado de las colisiones de núcleos de Pb. La enorme energía disponible en el centro de masas (100 mil veces la energía presente en las colisiones en el centro del Sol) permitirá la creación de un plasma de quarks y gluones de cuyo comportamiento se podrá aprender como evolucionó el universo en sus primeras etapas. Finalmente, en el cuarto detector, LHCb, se intentará entender a través de la producción de pares quark-antiquark (de tipo b) por qué hay más materia que antimateria.

En las Webs correspondientes a cada uno de estos detectores se puede encontrar toda la información sobre ellos, pero a fin de aproximarnos a las magnitudes involucradas bastan unos cuantos datos sobre uno de ellos.

En el detector CMS (Compact Muon Solenoid) podemos encontrar los siguientes números:

- La masa total es aproximadamente de 14500 toneladas, y su volumen es de  $22 \times 15 \times 15 \text{ m}^3$ .
- La primera área de detección (Tracker) contiene 250 m<sup>2</sup> de detectores de silicio, que extendida se correspondería con la superficie de una piscina de 25 m de largo.
- El calorímetro electromagnético (ECAL) está formado por 80000 cristales de tungstato de plomo, que a pesar de ser 98% metal en masa es totalmente transparente. Esos cristales tiene en total una masa equivalente a 24 elefantes africanos adultos. Son soportados por estructuras de fibra de carbono y fibra de vidrio de tan solo 0,4 mm de sección.
- El metal usado para la tapa del calorímetro hadrónico (HCAL) procede del reciclaje de cientos de toneladas de material de artillería de barcos de guerra rusos.
- El solenoide del CMS será el más grande jamás construido (6 m de diámetro y 12,5 m de largo) proporcionando un campo de 4 T, 100000 veces el valor del campo magnético terrestre. La cantidad de hierro utilizado como núcleo del imán es equivalente al usado para construir la Torre Eiffel.
- La energía almacenada en el solenoide cuando esté trabajando será de 2500 millones de Joules y podría ser usada para fundir 18 toneladas de oro.
- Habrá 15 millones de elementos individuales de detección.
- Durante un segundo de funcionamiento del CMS, el volumen de datos controlados será equivalente a 10000 Enciclopedias Británica.
- El número de procesadores necesarios para el filtro de sucesos equivaldrá a los 4000 existentes actualmente en el Cern.



Toroides del túnel ATLAS del LHC.

### Sobre la energía en el acelerador

Ya se ha hablado en una sección precedente de la presencia de la ecuación de Einstein, que relaciona masa y energía, en las colisiones protón-protón. Pero acerquémonos un poco más a los valores energéticos presentes.

En cada uno de los 2835 grupos de protones van unos cien mil millones de estas partículas, cada uno de los cuales ha sido acelerado hasta poseer una energía total de 7 TeV.

¿Y cuanto es esa energía expresada en unidades del S.I.? Calculémosla:

$$7 \text{ TeV} = 7 \cdot 10^{12} \text{ eV} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV} = 1,12 \cdot 10^{-6} \text{ J}$$

Si se entretiene el lector o lectora en calcular la energía cinética de un insecto de unos 60 mg que vuele a unos 20 cm/s verá que esa es la energía que posee.

Es decir, cada protón presentará en el LHC una energía semejante a la de un molesto mosquito. Pero, atención, ese mosquito tiene la masa de 36 mil trillones de protones, mientras que los 7 TeV en el LHC estarán “concentrados” en un solo protón.

Analicémoslo de otra manera. Hallemos la densidad energética presente en la colisión de dos protones de 7 TeV entre sí, y de dos mosquitos con esa misma energía. Para ello consideraremos el volumen de un protón en función del tamaño aceptado para él ( $r = 0,7 \cdot 10^{-15} \text{ m}$ ) y para el mosquito aceptamos un volumen de 1 mm<sup>3</sup>.

Entonces,

$$\text{densidad (protón)} = (7 \text{ TeV}) / (1,44 \cdot 10^{-45} \text{ m}^3) \rightarrow d(p) \approx 8 \cdot 10^{38} \text{ J/m}^3$$

$$\text{densidad (mosquito)} = (7 \text{ TeV}) / (1 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3) \rightarrow d(m) \approx 1 \cdot 10^3 \text{ J/m}^3$$

La diferencia entre ambas densidades energéticas habla por sí sola.

Además podemos calcular la energía en cada instante presente en cada paquete de protones,

$$1,12 \cdot 10^{-6} \text{ J/protón} \cdot 1,05 \cdot 10^{11} \text{ protones/grupo} = 1,2 \cdot 10^5 \text{ J}$$

Una moto de gran cilindrada –180 kg– a 130 km/h:

$$E_{\text{cinética}} = 1/2 \cdot 180 \cdot 36,1^2 = 1,2 \cdot 10^5 \text{ J}$$

Por tanto, ponerse en el medio de la trayectoria de los protones sería similar a ser golpeado por una gran moto a 130 km/h. Eso sí, la moto de la que hablamos en este caso no llega a las 20 billonésimas de gramo y su tamaño no supera el de un finísimo cabello de unos 7 cm de largo.

Si hay suerte y la esquivas, no te preocupes, vienen 2834 “motos” detrás. Y si saltas al “otro carril” te sucederá otro tanto, pero en sentido contrario.

Pero estos números para la energía de cada grupo no son una cuestión de broma para los responsables del LHC, pues uno de los problemas más serios que puede ocurrir es que un paquete de protones se salga de la trayectoria e impacte contra la instalación. La reparación de los daños significaría una parada del acelerador de varias semanas o incluso meses.

La energía total de cada uno de los haces será,

$$1,2 \cdot 10^5 \cdot 2835 = 340 \text{ MJ}$$

que es el equivalente a 60 kg de TNT.

Naturalmente, el suministro de esta enorme cantidad de energía a cada haz, unido a todos los demás requerimientos energéticos de la instalación, no puede ser realizado de forma instantánea. De hecho, para el caso de los protones, lo que se hace es ir progresivamente aportando energía en sucesivas fases. Se comienza con el acelerador lineal llamado LINAC2 que lleva a los protones hasta 50 MeV; se sigue con el primer sincrotrón –PSB– que los acelera hasta 1,4 GeV, para entrar en el segundo sincrotrón –PS– del que salen con 25 GeV; entran en el tercer sincrotrón –SPS– del que salen con los 450 GeV con que son inyectados en el LHC. En éste



alcanzarán los 7 TeV, siendo la duración de todo el proceso de unos 25 minutos. Además, como ya se ha comentado, en el LHC se le suministrará continuamente energía a los protones para compensar las pérdidas por radiación sincrotrón.

Tampoco se consiguen los casi 9 T de campo magnético en los dipolos superconductores de forma instantánea. Para obtener ese campo son necesarios 11,7 kA de corriente, a una tasa de 10 A por segundo. Así que se necesitan casi 20 minutos para estar en condiciones de operación.

## El campo magnético

Como ya se ha comentado, serán unos enormes dipolos magnéticos los encargados de “curvar” constantemente la trayectoria de los protones en los dos haces. Así que la Fuerza centrípeta actuante sobre las partículas será la Fuerza de Lorentz.

Un ingenioso diseño hace que en cada tubo el sentido del campo magnético sea contrario al del otro. Esto hace que al ir en cada tubo los protones en sentido contrario a los que viajan en el otro tubo, la fuerza magnética actúa con el mismo sentido. Así que lo que se tiene es un dipolo magnético doble o como se ha venido en llamar “2-in-1”.

En el LEP no se necesitaba esta solución –siendo necesario un único campo magnético– porque en un haz viajaban electrones y en el otro positrones. Las cargas eléctricas contrarias y los sentidos opuestos en el movimiento permitían que la fuerza generada por el único B curvase las trayectorias convenientemente.

En el caso del LHC se optó por este nuevo concepto, dada la dificultad de generar un haz de antiprotones con un número tan alto de antipartículas para la luminosidad requerida.

Con el cálculo ya realizado para la fuerza centrípeta podemos ahora conocer el Campo Magnético necesario para crear esa fuerza:

$$F_m = F_c$$

$$F_c = q \cdot v \cdot B$$

$$\text{Con: } F_c = 2.64 \cdot 10^{-10} \text{ N, } q = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C y } v \sim c.$$

$$\text{Tendremos, } B \sim 5,5 \text{ Tesla}$$

No obstante, habremos de tener en cuenta que los dipolos magnéticos no llenarán los 26659 m del LHC. Son necesarios otros muchos dispositivos: zonas de inyección de los protones, cavidades de radio-frecuencia para acelerar a los protones, multipolos magnéticos correctores, zonas de evacuación de los protones, y obviamente los inmensos detectores.

En efecto, los 1232 dipolos tienen una longitud cada uno de 14,3 m, así que cubren 17618 m.

Por tanto, el valor de B deberá ser mayor para realmente cubrir todo el trayecto:

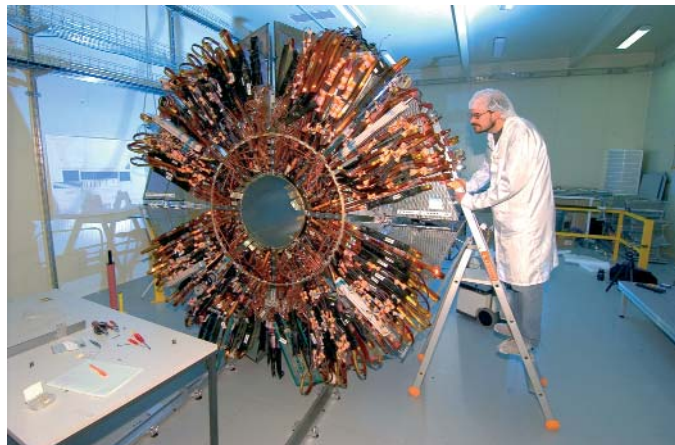
$$B = 5,5 \cdot 26659/17618 = 8,33 \text{ T}$$

Habrán incluso picos de 9 T, tratándose del mayor campo magnético jamás creado trabajando a esta escala.

Ese valor de 17618 m se puede entender como la longitud de curvatura efectiva, pues es en la que actúan los dipolos magnéticos. Podemos hallar el radio correspondiente a esa longitud y obtenemos el llamado “bending radius” que es otro parámetro importante del acelerador,

$$r_b = 17618/2\pi \rightarrow r_b = 2804 \text{ m}$$

Naturalmente, la necesidad de campos magnéticos va más allá de la simple creación de la fuerza que curve la trayectoria de las partículas. No es difícil entender que si en cada grupo van “empaquetados” unos cien mil millones de partículas con la misma carga, la tendencia es que se repelan y tiendan a separarse. Otros dos parámetros típicos de un acelerador se refieren a esta situación: “Beam Lifetime” que mide el tiempo de vida media para haz (que en el LHC es de 22 h) y el “Luminosity Lifetime” que da el tiempo de vida media útil (que para el LHC es de 10 h). Así pues, después de 22 horas de funcionamiento los dos haces están muy deteriorados, pero mucho antes, a las 10 horas, ya no se cumplen las condiciones necesarias para tener el valor de luminosidad que se requiere.



Detector del experimento ATLAS.

Para llegar a esas diez horas, necesitamos confinar a los protones y en un estrecho haz para así aumentar la probabilidad de que haya colisiones. Serán precisos verdaderos diseños multipolares magnéticos para que simultáneamente curven y confinen a los protones en un fino haz. Así en el sistema de la figura vemos que el primer cuadrupolo concentra el haz en sentido vertical mientras que el segundo lo hace en el horizontal.

Pero la Fuerza de Lorentz juega también otro papel estelar. En los propios detectores, será la encargada de curvar las partículas emergentes según su relación carga/masa. Esto generará la suficiente diversidad de trayectorias para que las partículas sean identificadas a su paso por las distintas secciones del detector. Básicamente, cualquiera de los cuatro detectores que trabajarán en el LHC son una estructura en la que se combinan potentes imanes y materiales sensibles al paso de los diferentes tipos de partículas.

Como ejemplo, podemos calcular el campo magnético existente en el interior del solenoide del CMS. Como para cualquier otro solenoide, el valor del campo en su interior viene dado por,

$$B = \mu_0 \cdot N \cdot I/L$$

Siendo  $N$  el número de vueltas,  $L$  su longitud e  $I$  la intensidad que circula.

En el CMS el solenoide está compuesto por 5 secciones cilíndricas de aluminio, cada una de las cuales presenta cuatro capas de 109 espiras cada una. Tenemos pues:  $N = 5 \cdot 4 \cdot 109 = 2180$  espiras. La longitud de cada sección es de 2,5

m por lo que en total  $L = 5 \cdot 2,5 = 12,5$  m. Y la corriente que circulará será de  $I = 19500$  A.

Con estos valores obtenemos para el campo magnético en el centro,  $B \sim 4$  T.

Ante la simplicidad del cálculo conviene, no obstante, recordar que estamos hablando de un solenoide enorme de 6 m de diámetro interior y 12,5 m de longitud, por el que circula una corriente de casi 20 mil amperios lo que obviamente obliga a que deban ser usadas condiciones de superconductividad. La temperatura en el solenoide será de 4,2 K.



Imanes de deflexión (dipolos). Cada dipolo pesa unas 35 T, son necesarios unos 1232 dipolos.

### Cargas y corrientes eléctricas

Calculemos la carga eléctrica total que hay en cada grupo de protones.

$$Q = 1,602 \cdot 10^{-19} \times 1,05 \cdot 10^{11} = 17 \text{ nC}$$

Cada grupo, supuesto puntual, repele a los grupos contiguos según la ley de Coulomb

$$F = 9 \cdot 10^9 \cdot (17 \cdot 10^{-9})^2 / (7,48)^2$$

$$F = 4,65 \cdot 10^{-8} \text{ N}$$

Como la masa de cada grupo es de un picogramo, el efecto sería muy importante, pero las fuerzas se compensan entre sí porque cada paquete tiene otro delante y otro detrás. No obstante, como la situación no es absolutamente simétrica y hay variaciones locales ya apuntadas en una sección anterior, poco a poco se van generando inestabilidades que hacen que la luminosidad decrezca irremediabilmente. La vida útil de cada haz no superará las diez horas de trabajo como ya se ha comentado.

Calculemos la corriente eléctrica que supone el movimiento de los protones en su viaje por el acelerador.

El número total de protones presentes es:

$$N = 2835 \cdot 1,05 \cdot 10^{11} = 3 \cdot 10^{14} \text{ protones}$$

Por tanto, en cada segundo por cada sección del tubo circula una carga eléctrica de:

$$Q = 3 \cdot 10^{14} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 11245 = 0,54 \text{ Culombios}$$

Como esta carga circula cada segundo,

$$I = 0,54 \text{ Amperios}$$

este es otro parámetro importante del acelerador.

En el LEP, el campo magnético que curvaba a los electrones y positrones era de 0,3 T con una potencia de 20 kW por imán.

Para sus 500 imanes hacían, pues, falta 10 MW (como comparación, téngase en cuenta que cada tren AVE precisa 8 MW). La resistencia en cada bobina del dipolo era  $R = 0,08 \Omega$ .

Como la corriente era de 500 A, tenemos que la Potencia disipada era:  $P = 500^2 \cdot 0,08 = 2 \cdot 10^4 \text{ J/s}$ .

Como había 500 imanes, la Potencia total disipada era  $P_T = 10^7 \text{ J/s} = 2400 \text{ Kcal/s}$

### Calor y superconductividad

Esa cantidad de calor que acabamos de calcular había que evacuarla en el LEP. En efecto, esta energía era extraída con agua que entraba a 15° C y salía a 95° C.

Usando  $Q = m \cdot c_e \cdot \Delta t$  llegamos a que la cantidad de agua necesaria es de 32 litros/s o 2 Tm/minuto.

Puede no parecer mucho, pero en un túnel a 100 m de profundidad evacuar cada minuto 2 toneladas de agua a 95°C no es poca cosa.

Recordemos ahora que el LHC utilizará campos magnéticos 30 veces mayores. Como la energía disipada varía con el cuadrado de la intensidad se precisarían 900 veces más agua, y por tanto,

$$30 \text{ Toneladas/segundo o } 1800 \text{ Toneladas/minuto}$$

Pero en cualquier caso el Hierro como material tiene su saturación magnética a 0,3 T, por lo que éste sería el mayor impedimento para alcanzar el valor de B necesario.

La solución es la Superconductividad. Habrá 1232 imanes superconductores de Niobio-Titanio con corrientes que alcanzarán los 11,7 kA y que permitirán lograr los 8,33 Teslas necesarios. Claro que para mantener la temperatura necesaria de apenas unos Kelvin se precisarán 5000 Tm de Helio, lo que supone la producción mundial de este gas noble en un año.

Es interesante citar aquí que el Premio Nobel de Física 2003 fue concedido a Abrikosov y Ginzburg (junto con Anthony Leggett) por su contribución a la comprensión de la superconductividad de materiales como la aleación Nb-Ti que será usada en el LHC.

Por otra parte, algo que por esperado no deja de ser impactante es el cambio en las longitudes debido a las condiciones de trabajo con tan bajas temperaturas. Hay varios materiales con coeficientes lineales de dilatación distintos y como sabemos estos varían además con la temperatura. No obstante, a efectos de aproximación, podemos tomar como coeficiente de dilatación lineal medio  $\alpha \approx 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  que es el orden de magnitud para la mayoría de los metales. La variación lineal viene dada por la expresión:  $\Delta L = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T$ , siendo  $L_0$  la longitud inicial y  $\Delta T$  la variación de temperatura.

La distancia entre los centros de los dos tubos de vacío es de 194,52 mm a 300 K. En condiciones de funcionamiento a 1,9 K tendremos,

$$\Delta L = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T \rightarrow \Delta L = 194,52 \cdot 10^{-5} \cdot (1,9 - 300) \rightarrow$$

$$\Delta L \approx -0,52 \text{ mm}$$

Habrà una reducción de medio milímetro, por lo que la distancia real que separará los dos haces en el LHC será de  $d = 194$  mm.



En cuanto a la longitud total del interior de cada dipolo (la llamada “Masa fría”) tenemos que a 300 K es de 14,343 m. Entonces al pasar a 1,9 K tendremos,

$$\Delta L = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T \rightarrow \Delta L = 14,343 \cdot 10^{-5} \cdot (1,9 - 300) \rightarrow \Delta L \approx -0,043 \text{ m}$$

Así que la longitud de la Masa Fría en funcionamiento será de 14,000 m.

Por tanto, la contracción es de más de 4 cm, y teniendo en cuenta que hay 1232 dipolos,

$$\Delta L_T \approx 1232 \cdot (-0,043) \approx 53 \text{ m (!)}$$

Otro parámetro importante en este dispositivo es la “curvatura del dipolo ( $\theta$ )”, que se obtiene dividiendo la circunferencia entre el número de dipolos,

$$\theta = 2\pi/1232 \rightarrow \theta = 5,099988 \text{ mrad}$$

Esta parámetro es la única característica geométrica que no cambia de valor con el descenso de temperatura.

### Algo de relatividad especial

Solamente en el último curso de Bachillerato podemos acercarnos muy tímidamente a este tópico de la Física. No obstante, dado que quizás sea un acelerador de partículas el mejor ejemplo para abordar la Relatividad Especial, y teniendo en cuenta que se cumplen cien años del “Annus mirabilis” de Einstein –por ello el 2005 es el Año Internacional de la Física–, en el que entre otros publicó sus dos famosos artículos sobre Relatividad Especial, entiendo que debe ser mencionada aunque sea sólo muy brevemente.

En el LHC cada protón alcanza los 7 TeV. Veamos el valor del parámetro relativista  $\gamma$  cuando el protón alcanza esa energía.

$$E = \gamma \cdot m_0 \cdot c^2 \rightarrow 7 \cdot 10^{12} \text{ eV} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV} = \gamma \cdot 1,673 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot (3 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2 \rightarrow \gamma \sim 7450$$

Como se aprecia  $\gamma \gg 1$ , así que estamos en los terrenos de la Relatividad Especial.

Podemos ahora verificar que la velocidad del protón con esa energía se aproxima a la de la luz,

En efecto,

$$\gamma = 1/[1 - (v/c)^2]^{1/2} \rightarrow \text{con } \gamma = 7450 \rightarrow v = 0,999 \cdot c \rightarrow v \sim c$$

Es habitual en la Física de Altas Energías el uso de unidades energéticas para otras magnitudes. Así la energía en reposo del protón será,

$$E_0 = m_0 \cdot c^2 \rightarrow E_0 = 1,673 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot (3 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2 \rightarrow E_0 = 1,503 \cdot 10^{-10} \text{ J} \\ E_0 = 1,503 \cdot 10^{-10} / 1,602 \cdot 10^{-19} = 9,383 \cdot 10^8 \text{ eV} \\ E_0 = 938,3 \text{ MeV}$$

Como  $m_0 = E_0/c^2$ , la masa en reposo puede ser escrita  $m_0 = 938,3 \text{ MeV}/c^2$ .

Podemos también expresarla con otros múltiplos,

$$m_0 = 0,9383 \text{ GeV}/c^2 \text{ o } m_0 = 0,0009383 \text{ TeV}/c^2$$

Aunque es un concepto controvertido, y no es aquí el lugar para esa discusión, podríamos expresar la energía final del protón en el LHC en forma de la llamada “masa relativista”,

$$m = E_0/c^2 \rightarrow m = 7 \text{ TeV}/c^2$$

Compárese los dos últimos valores indicados ( $m_0$  y  $m$ ) para observar el aumento experimentado.

También podemos obtener el valor del momento lineal del protón en términos relativistas,

$$E^2 = (p \cdot c)^2 + E_0^2 \rightarrow p \cdot c = (E^2 - E_0^2)^{1/2} \rightarrow p \cdot c = (7^2 - 0,0009383^2)^{1/2} \rightarrow p \sim 7 \text{ TeV}/c$$

El valor del momento lineal del protón es otro de los parámetros importantes del acelerador.

Finalmente, podemos calcular de otra forma a la vista en una sección anterior, el campo magnético presente en el acelerador

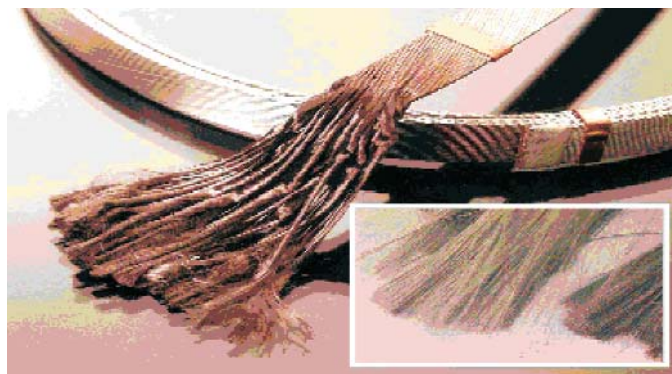
Usemos el radio efectivo (bending radius -  $r_b$ ) obtenido anteriormente en base a la distancia real cubierta por los dipolos magnéticos. Suponiendo un campo uniforme actuando sobre los protones en su movimiento a la velocidad de la luz, tendremos que,

$$F_{\text{centrípeta}} = F_{\text{magnética}} \rightarrow mc^2/r_b = q \cdot c \cdot B$$

Teniendo en cuenta que  $E = m \cdot c^2$ .

$$B = E/(c \cdot q \cdot r_b) \rightarrow B = 1,12 \cdot 10^{-6} / (3 \cdot 10^8 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 2804) \rightarrow B = 8,33 \text{ T}$$

Llegamos, pues, al mismo valor obtenido con anterioridad.



Cables superconductores de niobio-titanio, utilizados en el LHC.

### Terminando por el principio (de incertidumbre)

El Modelo Estándar propone, como es sabido, que las partículas interactúan a través del intercambio de partículas virtuales: fotones,  $W^\pm$ ,  $Z^0$ , gluones y gravitones (estos últimos sin ser todavía descubiertos).

La idea es que dos partículas “sienten” fuerza entre ellas (interaccionan) intercambiando otras partículas que solamente están presentes durante el proceso de interacción.

El tópico físico presente es el Principio de Incertidumbre de Heisenberg.

Tomándolo en la forma  $\Delta E \cdot \Delta t \geq h/4\pi$  podemos definirlo para nuestro propósito de la forma siguiente: “En un proceso físico el producto de la imprecisión en el valor de la energía y la imprecisión en el valor del intervalo de tiempo que dura ese proceso es siempre mayor o igual que  $h/4\pi$ . Por tanto, será posible que durante un intervalo de tiempo  $\Delta t$  pueda aparecer de la nada una energía  $\Delta E$ , sin que se viole



este principio, con tal que pasado ese tiempo desaparezca esa energía”.

Por tanto, el viejo Principio de la Conservación de la Energía (“la Energía ni se crea ni se destruye”) queda en “suspense” en un intervalo  $\Delta t$ .

Naturalmente, como la constante de Planck es del orden de  $10^{-34}$ , ni las imprecisiones en la medida de las energías ni los tiempos involucrados pueden ser muy grandes. De hecho repartiendo ese orden de magnitud entre ambas medidas vemos que los errores posibles son del orden de  $10^{-17}$  que están muy por debajo de nuestras posibilidades de medida. Así que podemos seguir usando con confianza el viejo Principio de Conservación en los fenómenos macroscópicos habituales.

Sin embargo, cuando vamos al terreno de lo muy pequeño las cosas ya no son así.

En efecto, energías e intervalos de tiempo del orden de  $10^{-17}$  son absolutamente normales en el mundo de las interacciones entre partículas subatómicas. Es aquí donde el Principio de Incertidumbre adquiere todo su poder de aplicación. Si en lugar del término Energía introducimos el término Masa ( $\Delta m$ ), a través de la relación de Einstein tendremos:

$$\Delta m \cdot c^2 \cdot \Delta t \geq h/4\pi \rightarrow \Delta m \cdot \Delta t \geq h/4\pi \cdot c^2$$

El mismo razonamiento hecho con anterioridad es ahora aplicable en términos de masa: “En un intervalo de tiempo  $\Delta t$  puede aparecer una masa  $\Delta m$ , o lo que es lo mismo, puede aparecer de la nada una partícula”.

Como se trata de una partícula efímera que aparece y desaparece en un intervalo de tiempo tan pequeño, en el marco del principio de incertidumbre, hablamos de una partícula virtual.

A la vista de lo que acabamos de indicar, es fácil darse cuenta que “la propia nada” ya no puede tener en Física el significado que corrientemente se le da. Aún podemos trabajar un poco más con la relación anterior para encontrar algún dato más. Supongamos que la partícula virtual creada lleve la velocidad de la luz. Entonces en el intervalo  $\Delta t$  recorrerá un espacio  $\Delta L/c$ , por lo que la relación de Heisenberg puede ser escrita así:

$$\Delta m \cdot \Delta L/c \geq h/4\pi \cdot c^2 \rightarrow \Delta m \cdot \Delta L \geq h/4\pi \cdot c$$

y por tanto, el Principio de Incertidumbre vincula en esta ocasión, la masa de la partícula virtual con el trayecto durante el cual existe. Si la masa es nula la partícula podrá viajar un trayecto infinito. Esta es la razón por la cual un fotón virtual o un gravitón permiten, respectivamente, la interacción electromagnética o la gravitatoria entre dos partículas que estén separadas una distancia infinita.

Sin embargo, si suponemos la interacción entre nucleones dentro del núcleo atómico, con  $\Delta L \sim 10^{-15}$  m, podemos calcular con la relación anterior la masa de la partícula virtual presente en la interacción:

$$\Delta m \cdot 10^{-15} \geq h/4\pi \cdot c \rightarrow \Delta m \sim 1,76 \cdot 10^{-28} \text{ kg} \rightarrow \Delta m \sim 200 m_e$$

Se trata pues de una partícula virtual con un masa una docenas veces la masa del electrón.

Es la partícula llamada “pión” por Yukawa en los años 1930 y que se supuso portadora de la interacción nuclear fuerte. Desde hace tiempo se sabe que en realidad la verda-

dera interacción fuerte ocurre entre los quarks, siendo los gluones los portadores de esa interacción.

Si nos referimos a la “interacción nuclear débil” que ocurre entre partículas a distancias muy inferiores al tamaño de un núcleo, tendremos:

$$\text{Con } \Delta L \sim 10^{-18} \text{ m} \rightarrow \Delta m \cdot 10^{-18} \geq h/4\pi \cdot c \rightarrow \Delta m \sim 1,76 \cdot 10^{-25} \text{ kg} \\ \rightarrow \Delta m \sim 100 m_p$$

Por tanto las partículas virtuales presentes en la interacción débil tendrán una masa del orden de 100 veces la masa del protón. Son las partículas  $W^\pm$  y  $Z^0$  descubiertas en el CERN en los inicios de los años 80 del siglo pasado y por cuyo descubrimiento se le concedió el Premio Nobel a Rubbia y a Van der Meer.

Acabamos de ver a través de cálculos sencillos otra forma de interpretar el Principio de Incertidumbre. Es diferente de la habitual en los libros de texto de secundaria, en los que suele aparecer referido a la indeterminación de la posición y el momento de una partícula, y vinculado casi con exclusividad al nacimiento de la Mecánica Cuántica y a los orbitales atómicos.

Pero además, a nadie se le escapa que este principio nos puede dar pie para hablar de cosas que en un centro de secundaria parecen monopolio de otras materias: lo virtual, la nada, la interacción, la materia, la realidad, la observación, el azar, el destino, etc.

### Finalizando

En realidad, son muchas cosas más las que se pueden comentar a fin de llevar al alumnado al extraordinario trabajo que se está desarrollando en el CERN, pero también en decenas de instituciones (muchas españolas) que en todo el mundo colaboran en sus investigaciones. Desde las dimensiones de los detectores (alguno con más peso que la Torre Eiffel), o sus montajes a cien metros bajo tierra en enormes “cavernas”, hasta las fronteras físicas a las que se pretende llegar: partículas supersimétricas, desigualdad entre materia y antimateria, el estudio del plasma de quarks y gluones, materia oscura...

Los cuatro detectores del LHC (CMS, ATLAS, LHCb y ALICE) se van a encargar durante los próximos años de hacer realidad todo esto. Cualquiera de estos detectores ya merece por sí solo una atención especial, y aunque alguno de los retos propuestos no pudiese ser conseguido, simplemente las tecnologías que están generando justificarían su desarrollo.

El LHC con un coste de 2100 millones de euros, debe empezar a funcionar en 2007. España es uno de los 20 países miembros del CERN, aportando 47,5 millones de euros, lo que supone el 7,5% del presupuesto anual. Con las contribuciones obligatorias de los países miembros del laboratorio se atiende a la construcción del LHC, mientras que los detectores del mismo dependen de la financiación de los integrantes de la colaboración en cada caso. Así, España, cuyos científicos están trabajando activamente en los detectores Atlas, CMS y LHCb, contribuye con aproximadamente el 2% del coste total de los mismos. Se debe aquí mencionar el orgullo que representa para la Física española que desde el mes de enero de 2005, Mar Garrido Capeáns, física gallega, perte-

nezca al llamado “staff científico permanente” del Cern, siendo la primera mujer española que lo consigue.

También debe ser señalado que el Premio Nobel de Física 2004 ha sido concedido a tres físicos norteamericanos –David J. Gross, David Politzer y Frank Wilczek– por sus contribuciones a la comprensión del comportamiento de los quarks.

Deseo terminar citando una de las tareas que con más entusiasmo se van a afrontar a partir del 2007, y que ya fue mencionada con anterioridad. Se trata de la detección de la partícula Higgs. Está partícula, propuesta por el físico escocés del mismo nombre y por Francois Englert, Robert Brout, Gerald Guralnik, Dick Hagen y Tom Kibble, es de alguna manera la que cerraría el Modelo Estándar de las Partículas Elementales al explicar con su presencia como las demás partículas tienen las masas que tienen. En pocas palabras, el universo está lleno de este tipo de partículas que se acoplan de distinta manera al resto de partículas. Así, no se acoplan a los fotones, por lo que estos no presentan resistencia al movimiento (masa nula), mientras que se acoplan mucho a los quarks Top, lo que hace que estos sean supermasivos. Está siendo buscada desde hace tiempo y el LEP estuvo a punto de descubrirla justo antes de ser clausurado, mientras que el Tevatron del Fermilab de Chicago le sigue la pista muy de cerca. Sin duda, su descubrimiento, constituirá uno de los hitos de la Física de todos los tiempos.

### Agradecimientos

El autor quiere expresar su agradecimiento al CERN por haberle permitido participar en el High School Teachers 2003, celebrado en Julio de 2003 en Ginebra, y que con siete ediciones se está convirtiendo en una magnífica escuela para que profesores y profesoras de Secundaria de muchas nacionalidades puedan conocer uno de los mejores centros de investigación en Física del mundo.

En particular quiero mencionar la inestimable ayuda de Mick Storr, Michelangelo Mangano y Gron Tudor Jones que nos acercaron el mundo de la Física de Partículas con paciencia, dedicación y sabiduría.

### Bibliografía

#### a) Algunos libros de divulgación

- [1] FEYNMAN R., WEINBERG S. (1991). “Las partículas elementales y las leyes de la física”. Gedisa. Barcelona.

- [2] FRITZSCH HARALD. (1982) “Los quarks, la materia prima de nuestro Universo”. Alianza Editorial. Madrid.
- [3] GLASHOW S., BOVA B. (1994). “Interacciones (Una visión del mundo desde el “encanto de los átomos”)”. Editorial Tusquets, colección Metatemáticas 34. Barcelona
- [4] GREENE B. (2001). “El Universo Elegante”. Crítica., Barcelona.
- [5] t'HOOFT G. (2001) “Partículas elementales”. Crítica, Barcelona.
- [6] LEDERMAN L-, TERESI D (1996). “La partícula divina. Si el Universo es la respuesta, ¿cuál es la pregunta?”. Editorial Crítica, colección Drakontos. Barcelona
- [7] YNDURÁIN F.J. (2001). “Electrones, neutrinos y quarks. La física de partículas ante el nuevo milenio”. Editorial Crítica, colección Drakontos. Barcelona,

#### b) Algunos artículos

- [8] AGUILAR M. (2004) El CERN cumple 50 años. *Revista Española de Física* **18** (4) (pp 3-15).
- [9] AGUILAR M., YNDURAIN F.J. (2003). El CERN y la Física de Altas Energías en España. *Revista Española de Física* **17** (3) (pp 17-25).
- [10] CID R., (2001) Partículas elementais. *Boletín das Ciências* nº 47 (pp 43-61).
- [11] CID R., (2005) “Contextualized magnetism in secondary school: learning from the LHC (CERN)” *Physics Education*, **40** (4), pp. 332-338.
- [12] DOBADO A. (1994). El descubrimiento del quark *t*. *Revista Española de Física* **8** (3).
- [13] ESPRIU D., PICH A.(2003) El mundo de los quarks. *Revista Española de Física* **17** (3) (pp 27-34).
- [14] JONES G.T.(2002). The uncertainty principle, virtual particles and real forces. *Physics Education* **37**(3) (pp 223-233).
- [15] MAESTRE J.A., JOSA I. (2000). Búsqueda experimental del bosón de Higgs. *Revista Española de Física* **14** (2) (pp. 27-30).
- [16] SANCHEZ DEL RIO C., (2003). Del átomo al quark. *Revista Española de Física* **17** (3) (pp 16)
- [17] YNDURAIN F.J.(2004) La libertad asintótica o como el modelo de los quarks se hizo respetable. *Revista Española de Física* **18** (4) (pp 16-19).

#### c) Algunas Webs

- [18] High School Teachers at CERN. <http://teachers.web.cern.ch>
- [19] CERN. <http://www.cern.ch>
- [20] LHC. <http://lhc-new-homepage.web.cern.ch>
- [21] Detector CMS. <http://cmsdoc.cern.ch/cms/outreach/html/index.shtml>
- [22] Detector ATLAS. <http://atlasexperiment.org/index.html>
- [23] Detector ALICE. <http://alice.web.cern.ch/Alice/AliceNew/>
- [24] Detector LHCb. <http://lhcb.web.cern.ch/lhcb/>
- [25] Viaje al corazón de la materia. <http://palmera.pntic.mec.es/~fbarrada/>

**Ramón Cid Manzano**

están en el I.E.S. de Sar. Santiago. (A Coruña)



## Evaluación y Medidas Correctoras para Reducir el Ruido Ambiental por Infraestructuras de Transporte y Urbano (3a Edición). 24-26 de abril de 2006

Santiago Expósito Paje. ([santiago.exposito@uclm.es](mailto:santiago.exposito@uclm.es)) Dpto. Física Aplicada  
E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Castilla-La Mancha.

Para más información:

<http://www.uclm.es/actividades0506/cursos/ruido/>