

Luminosidad: la luz al final del túnel (LHC)



Xabier Cid Vidal¹, Ramón Cid Manzano²

¹*Departamento de Física de Partículas, Universidad de Santiago, Campus Universitario Sur 15782 - Santiago de Compostela, España.*

²*Instituto de Enseñanza Secundaria "IES de Sar", R/Bernardo Barreiro de Vázquez Varela s/n, 15702 - Santiago de Compostela, España.*

E-mail: xcidvidal@gmail.com

(Recibido el 2 de Junio de 2009; aceptado el 14 de Agosto de 2009)

Resumen

El acelerador de partículas LHC (Large hadron Collider en el CERN – Ginebra) estará otra vez operativo en las últimas semanas de 2009. En máxima operación genera la mayor cantidad de información nunca antes obtenida en otro experimento, revelando alguno de los más fundamentales secretos de la naturaleza. A pesar de la enorme información que hay disponible, no es sencillo encontrar explicaciones sencillas para los no especialistas sobre la Física que está presente en este experimento. Nosotros hemos ya introducido para los cursos de secundaria algunos de los tópicos fundamentales, Cid [1, 2, 3], siendo el objetivo de este artículo presentar el parámetro quizás más importante del acelerador -la luminosidad- incluyendo además otras informaciones de interés sobre este crucial experimento. Los cálculos utilizados están adaptados para la Física de secundaria y son sencillas aproximaciones a los resultados correctos.

Palabras clave: Enseñanza de conceptos en Física, Física de Partículas en Secundaria.

Abstract

The LHC (Large Hadron Collider at CERN-Geneve) will be working again in the last weeks of 2009. When in total operation, LHC generates the greatest amount of information that has ever been produced in an experiment before, revealing some of the most fundamental secrets of nature. Despite the enormous amount of information available about this topic, it is not easy for non-specialists to know where the data comes from. We have already introduced some of the LHC physics topics, Cid [1, 2, 3], and the aim of this article is to take to Secondary School classroom one of its most important parameters: luminosity. Furthermore, we include other interesting informations on this crucial experiment. The calculations that you will be finding in this article are adapted for the Physics of Secondary School and in most cases they are just very simple approaches to the correct results.

Keywords: Physics Teaching, Particle Physics in Secondary School.

PACS: 01.40.-d, 01.40.E-, 10.00.00, 29.20.db

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

The European Organization for Nuclear Research (originalmente: Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire), comúnmente conocido como CERN, es el más grande laboratorio de Física de Partículas del mundo, y está situado en Ginebra en la frontera entre Francia y Suiza.

Su principal función es proporcionar su complejo de aceleradores y otras infraestructuras para la investigación en la Física de Altas Energías. En más de cincuenta años de vida, Aguilar [4], una enorme cantidad de experimentos han sido llevados a cabo en el CERN a través de colaboraciones internacionales.

En el CERN trabajan diariamente unas 2600 personas. Además, alrededor de unos 8000 científicos e ingenieros (pertenecientes a unas 500 instituciones y 80

nacionalidades), trabajan en experimentos operados en el CERN desde todas partes del mundo.

En un túnel circular de 27 km y situado a 100 m bajo tierra está ubicado el LHC (Large Hadron Collider), el más potente de los aceleradores de partículas del mundo. No es pues necesario explicar el nombre de *Large*.

En el LHC se aceleran dos haces (beams) de partículas del mismo tipo, sean protones o núcleos de elementos pesados como el Pb. Estas partículas están formadas por quarks y por tanto “sienten” la fuerza fuerte nuclear. Son por tanto *Hadrones*.

Finalmente, el nombre de *Collider*, colisionador, responde al hecho de ser una máquina en la que haces de partículas colisionan circulando en sentidos contrarios. Esto tiene la gran ventaja de que la energía de la colisión es la suma de las energías de los dos haces.

Hay que hacer una precisión en relación a la diferencia entre colisionador y acelerador. En sentido estricto, un

acelerador tiene como función incrementar la velocidad de las partículas. Esto es lo que se hace en el CERN con una cadena de aceleradores (Linacs, PSB, PS y SPS) que llevan a los protones en aceleración progresiva hasta el LHC. En un colisionador las partículas son aceleradas hasta su velocidad máxima en un muy breve lapso de tiempo. Su función principal es mantener esa velocidad constante durante horas de operación diaria, permitiendo así billones de colisiones. Por tanto el LHC es un colisionador, aunque es también habitual definirlo de forma genérica como un acelerador de partículas.

En cuatro zonas del anillo se produce la interacción entre las partículas de los haces, estando instalados en esos cuatro puntos los enormes detectores: ATLAS, CMS, ALICE y LHCb.

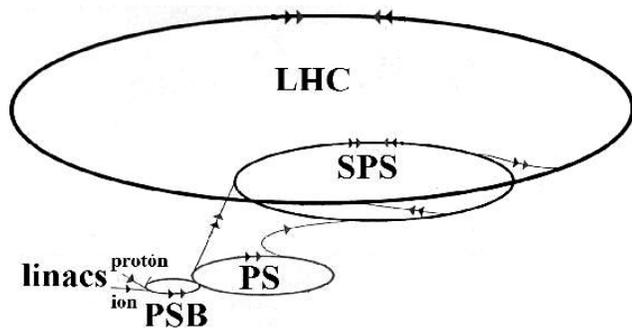


FIGURA 1. Se muestra la cadena de aceleradores del CERN que comenzando en los aceleradores lineales (linacs) llevarán a los protones (o iones de metales pesados, como el Pb) hasta el LHC.

En las condiciones ideales en el LHC, las colisiones proporcionarán una energía máxima en el centro de masas de 14 TeV. Nótese que se trata de una energía "macroscópica" ($\sim 10^{-6}$ J) aplicada en un contexto de partícula elemental. Si comparamos esta energía con el producto $k \cdot T$, siendo k la constante de Boltzmann, estamos en el orden de una temperatura de 10^{17} K. Por tanto, los sucesos que se esperan son inéditos, y por ello el desarrollo que se va a seguir en Física fundamental va a ser extraordinario. No es extraño que todo esto haya causado hasta temor en ciertos círculos, lo que ha desencadenado una histeria absolutamente infundada en Internet y en ciertos medios de comunicación. En un reciente artículo, Cid [5], hemos tratado de situar esta cuestión en los límites que la Física proporciona, de donde nunca debió de salir.

II. LAS COLISIONES

En los dos tubos por los que los haces viajan en sentido contrario se necesita un alto vacío para garantizar el mayor número de partículas en los puntos de colisión. La presión en el interior es del orden de sólo una mil millonésima de atmósfera.

Los protones van "empaquetados" en grupos (bunches) de 7,48 cm de longitud y 1 mm^2 de sección, cuando están

lejos de zonas de interacción, y de $16 \times 16 \text{ }\mu\text{m}$ en las zonas de interacción (detectores).

Los paquetes de protones distan entre sí 7,5 m. Por tanto, en la circunferencia de 27 km debería haber:

$$27000 / 7,5 \sim 3600 \text{ bunches}$$

Sin embargo, para poder insertar nuevos paquetes, cuando son extraídos otros que ya no son operativos, es necesario disponer de espacio suficiente. Se ha establecido como número adecuado de bunches el de 2808.

Cada bunch contiene $1,15 \cdot 10^{11}$ protones (1 cm^3 de H_2 en condiciones normales contiene del orden de 10^{19} protones).

Como ya se ha comentado, cada paquete de 7,48 cm de longitud es "colimado" o comprimido hasta una dimensión de sección de $16 \times 16 \text{ }\mu\text{m}$ cuando llega a los puntos de interacción (Interaction Point - IP) donde tienen lugar las colisiones.

El volumen de cada paquete es en el punto de interacción aproximadamente en micras cúbicas:

$$(74800 \times 16 \times 16).$$

Y el "volumen ocupado" por cada protón en el punto de interacción es:

$$(74800 \times 16 \times 16) / (1,15 \cdot 10^{11}) \sim 10^{-4} \text{ }\mu\text{m}^3.$$

Eso es aún muchísimo mayor que el volumen que ocupa un átomo. Por tanto una colisión es algo extremadamente infrecuente.

La Probabilidad de que un protón de un paquete golpee a otro protón de un paquete que viene en sentido contrario se puede obtener aproximadamente a partir del cociente entre el tamaño del protón (d^2 con $d \sim 1 \text{ Fermi} = 10^{-15} \text{ m}$) y el tamaño de la sección del bunch (r^2 , con $r = 16 \text{ }\mu\text{m}$), en el punto de interacción.

Entonces:

$$\begin{aligned} \text{Probabilidad} &\approx (d^2)/(r^2), \\ \text{Probabilidad} &\approx 4 \cdot 10^{-21}. \end{aligned} \quad (1)$$

Siendo N el número de protones por bunch, el número de interacciones será:

$$\begin{aligned} \text{N}^\circ \text{ Interacciones} &= \text{Probabilidad} \times N^2 \\ &= (4 \cdot 10^{-21}) \times (1,15 \cdot 10^{11})^2. \end{aligned} \quad (2)$$

Por tanto unas 50 interacciones en cada cruce.

Pero solo una fracción de esas interacciones ($\sim 50\%$) son choques inelásticos que dan lugar a la creación de nuevas partículas.

Por tanto, habrá alrededor de 20 colisiones "efectivas" por cada cruce.

Los paquetes de protones recorren a prácticamente la velocidad de la luz los 27 km del colisionador. Por tanto, el número de veces que pasan por cada punto de interacción es:

$$n = 300000 / 27.$$

Es decir unos 11100 cruces por segundo. Como hay 2808 paquetes:

$$11100 \times 2808 \sim 30 \cdot 10^6 \text{ cruces/s}$$

que es el llamado "average crossing rate".

Recordando que en cada cruce se producen unas 20 colisiones efectivas,

$$(30 \cdot 10^6 \text{ cruces/s}) \times (20 \text{ colisiones/cruce}) \\ 600 \text{ millones colisiones/s}$$

Habría que desechar la mayoría de los sucesos que se van a producir por no ser de interés, pero aún así la tarea que tendrán que acometer los grupos de investigación va a ser ingente para desarrollar el programa experimental previsto, Albajar [6]. Una nueva revolución informática, GRID [7], está siendo preparada para llevar a cabo todo este trabajo.

III. LUMINOSIDAD

La *luminosidad* instantánea de un colisionador mide el número de colisiones por unidad de área y tiempo que se producen en el mismo. Se trata pues del parámetro clave para medir la eficacia del acelerador.

El razonamiento es sencillo: cuantas más colisiones tengamos en los puntos de interacción más probable es que ocurra uno de esos eventos singulares para los que se ha diseñado esta enorme máquina.

Parecería entonces fácil incrementar este parámetro con solo introducir más y más protones en el sistema. Por una parte debemos agruparlos en paquetes para tener secuencias de colisiones compatibles con los tiempos de proceso en los detectores. Pero además, y como es obvio, los protones se repelen, por lo que su número depende de la eficacia de los sistemas de focalización. También los grupos de partículas se repelen entre sí, tanto en sus respectivos haces como con los contrarios en cada cruce.

Hay pues que encontrar un compromiso entre la energía de colisión, el número de partículas por paquete, y el número de paquetes por haz para llegar al máximo tiempo de trabajo diario en condiciones óptimas. Podemos decir que la luminosidad de un acelerador de partículas resume en un solo número todos estos detalles.

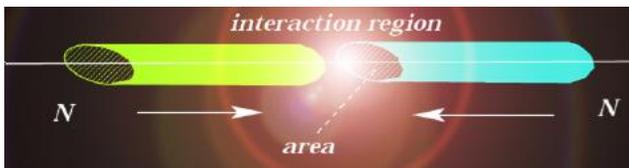


FIGURA 2. La luminosidad nos da el número de colisiones posibles por unidad de área y tiempo.

Luminosidad: la luz al final del túnel (LHC)

Vamos a acercarnos a este parámetro de forma semicuantitativa para llegar a comprender su importancia.

En primer lugar necesitamos saber cada cuanto tiempo los paquetes se cruzan en los puntos de interacción. Ya hemos dicho que la distancia entre dos paquetes de protones consecutivos es del orden 7,5 m.

Así que el llamado "time between bunches" -bunch spacing- será:

$$t = \text{distancia} / \text{velocidad} \rightarrow t = 7,5 / 3 \cdot 10^8, \\ t = 25 \cdot 10^{-9} \text{ s} \rightarrow t = 25 \text{ ns}$$

que también es un parámetro muy importante en un acelerador.

En nuestra aproximación t es el tiempo que transcurre desde un cruce de dos paquetes y el siguiente.

En segundo lugar, tomamos en consideración que cada protón de los N de un paquete puede colisionar con cualquiera de los N del otro paquete. Por tanto el número total de colisiones posibles será N^2 . Como ya se ha indicado $N \approx 10^{11}$.

En tercer lugar debemos considerar la superficie que cada paquete ofrece al que viene de frente. Siendo " d " el tamaño de la sección de cada paquete, como ya se ha indicado anteriormente ($d \approx 16 \mu\text{m} \rightarrow d \approx 16 \cdot 10^{-4} \text{ cm}$), la superficie de colisión es del orden de d^2 .

Por tanto, el número de colisiones por unidad de tiempo y superficie, es decir la *luminosidad*, será

$$L = \frac{N^2}{t \cdot d^2}, \quad (3)$$

y con los valores considerados antes:

$$L \approx \frac{(10^{11})^2}{(25 \cdot 10^{-9})(16 \cdot 10^{-4})^2} \Rightarrow L \approx 10^{35} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}. \quad (4)$$

No obstante, la "superficie efectiva" de colisión en un tratamiento matemático más exacto responde a $4\pi d^2$.

Por tanto luminosidad será en realidad de un orden de magnitud inferior:

$$L \approx 10^{34} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}.$$

Así, en los puntos de interacción donde se alcance este valor de L se pueden producir 10^{34} colisiones por segundo y por cm^2 .

Este representa unas 100 veces más que el valor en el acelerador Tevatron en Chicago (USA), por lo que los eventos raros en el LHC serán mucho más frecuentes.

También se utiliza como magnitud la llamada *luminosidad integrada* que es la integral de la luminosidad instantánea sobre el tiempo de funcionamiento del colisionador ($L \cdot \Delta t$).

Para tener una estimación del número de sucesos para un evento concreto necesitamos conocer la probabilidad de que una colisión de lugar a ese evento.

Cuando hablamos de colisiones esa probabilidad se conoce como *sección eficaz* (σ). Esta magnitud se expresa en unidades de superficie, y en particular con una unidad llamada "barn":

$$1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2.$$

Entonces, el número de sucesos que se producen, de un determinado proceso físico, es proporcional al producto de la sección eficaz de dicho proceso, a esa energía, por la luminosidad integrada. Por tanto, para acceder a procesos con una baja sección eficaz de producción es necesaria una gran luminosidad integrada, que en el LHC se consigue con una altísima luminosidad instantánea.

Podemos escribir la siguiente expresión para el número de eventos esperados de un determinado proceso en un determinado tiempo:

$$\begin{aligned} \text{N}^\circ \text{ eventos} &= \text{Sección eficaz} \times \text{Luminosidad integrada,} \\ \text{N}^\circ \text{ eventos} &= \sigma \cdot L \cdot \Delta t. \end{aligned} \quad (5)$$

En el LHC se suman entonces dos contribuciones: mayor sección eficaz (al ser mayor la energía de colisión) y mayor luminosidad integrada.

Veamos el ejemplo de cómo utilizar estas magnitudes para conocer el número de sucesos en los que se aparecería la partícula o bosón de Higgs (uno de los objetivos fundamentales del experimento LHC), en cada segundo.

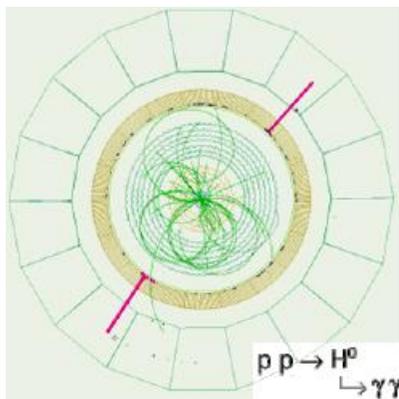


FIGURA 3. Imagen que muestra unos de los sucesos candidatos a la generación del bosón de Higgs (H^0). En la colisión de dos protones (pp) se produce un H^0 para de inmediato desintegrarse en dos fotones ($\gamma\gamma$).

La sección eficaz para un evento en el que aparecería un bosón de Higgs, de 100 GeV de masa, es 50 fb (femto-barn).

Así que,

$$\sigma = (50 \cdot 10^{-15}) \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2 \rightarrow \sigma = 5 \cdot 10^{-38} \text{ cm}^2.$$

Si tomamos 10 horas de funcionamiento del LHC en un

día tendremos:

$$\begin{aligned} \text{N}^\circ \text{ eventos} &= \sigma \cdot L \cdot \Delta t, \\ \text{N}^\circ \text{ eventos} &= (5 \cdot 10^{-38})(10^{34})(10 \cdot 3600), \\ \text{N}^\circ \text{ eventos} &= 18 \text{ (~20 eventos)}. \end{aligned} \quad (6)$$

Por tanto, en 10 horas de un día de funcionamiento, serían unos 20 bosones de Higgs los que podrían ser detectados. Pero billones de colisiones se producirán en el detector en ese tiempo. Se comprende que el trabajo para distinguir esos 20 eventos en el medio de tantos otros implica un trabajo de computación colosal.

Después de que el LHC haya operado durante algunos años con parámetros nominales será necesario mejorarlos para alcanzar una más alta luminosidad. La forma más directa de aumentar la luminosidad es focalizar los haces de protones más estrechamente en los puntos de colisión (reducir el valor de d^2 en la fórmula de L), lo que implicará un rediseño de la "óptica magnética" en las regiones de interacción.

El tiempo a considerar estará muy relacionado con la vida operativa de los sistemas magnéticos actuales sometidos durante la operación del LHC a muy altas dosis de radiación. Puede estimarse que estamos hablando de alrededor del año 2015.

Otra reestructuración tiene que ver con la cadena de inyección de los haces en el anillo y que se perfila para el horizonte de 2020.

Otras opciones también consideradas para incrementar la luminosidad del LHC, son el aumento del número de "bunches", o el aumento del número de protones por "bunch". No obstante, hay limitaciones en como esos parámetros pueden ser variados, tales como el límite operativo de bunches y las llamadas interacciones haz-haz de largo rango (que se producen entre bunches antes de que se crucen), los efectos debidos a las nubes de electrones procedentes de las paredes de los tubos, implicaciones en la protección de los sistemas de colimación, o un excesivo "apilamiento" de sucesos en el detector.

IV. CONCLUSIONES

A lo largo de este artículo hemos presentado diferentes magnitudes y conceptos que son muy importantes en un acelerador: *average crossing rate*, *bunch spacing*, *luminosidad instantánea e integrada* y *sección eficaz*.

Hemos realizado algunos cálculos que nos han permitido iniciarnos en el conocimiento de cómo funciona la máquina más grande y compleja nunca antes construida. También hemos visto cómo realizar una estimación del número de sucesos que se esperan de un determinado evento en función de los parámetros luminosidad integrada y sección eficaz.

Todo ello se ha pretendido evitando el uso de fórmulas y deducciones matemáticas complicadas a fin de que sean accesibles al nivel de enseñanza no especializada.

Si el lector está interesado en cálculos de igual

intención sobre otras magnitudes, puede encontrarlos en las referencias que se citan y también en Sitio Web “Acercándonos al LHC” [8].

REFERENCIAS

- [1] Cid, R., *Contextualized magnetism in secondary school: learning from the LHC (CERN)*, Phys. Educ. **40**, 332-338 (2005).
[2] Cid, R., *Cálculos sencillos para la máquina más compleja. Aprendiendo Física en la secundaria desde el*

- Luminosidad: la luz al final del túnel (LHC) LHC (CERN)*, Revista Española de Física **20**, 48-57 (2006).
[3] Cid, X., Cid, R., *Taking energy to Physics classroom from LHC (CERN)*, Phys. Educ. **44**, 78-83 (2009).
[4] AGUILAR, M., *El CERN cumple 50 años*. Revista Española de Física **18**, 3-15 (2004).
[5] Cid, X., Cid, R., *¿Es segura la Tierra para el LHC (CERN)?* Revista Española de Física **22**, 33-36 (2008).
[6] Albajar, C. *et al.*, *El programa experimental del LHC*, Revista Española de Física **20**, 18-24 (2006).
[7] GRID <http://www.gridcafe.org/index_ES.html>, Consultado el 17 de Septiembre de 2009.
[8] “Acercándonos al LHC” <<http://www.lhc-closer.es>> Consultado el 17 de Septiembre de 2009.