

El Gran Colisionador de Hadrones (Large Hadron Collider) (10 PUNTOS)

Lea las instrucciones generales dentro del sobre adjunto antes de comenzar.

En este problema discutiremos la física del acelerador de partículas LHC (Large Hadron Collider) del CERN. El CERN es el mayor laboratorio de física de partículas del mundo. Su principal objetivo es dilucidar las leyes fundamentales de la naturaleza. El funcionamiento básico consiste en acelerar a altas energías dos haces de partículas, que se guían alrededor de un anillo mediante un potente campo magnético y después se hacen colisionar entre sí. Los protones no están distribuidos uniformemente alrededor de la circunferencia del acelerador, sino que se agrupan en paquetes o racimos (*bunches*). Las partículas producidas por estas colisiones se observan por medio de grandes detectores.

En la Tabla 1 se listan algunos parámetros del LHC.

Anillo del LHC	
Circunferencia del anillo	26659 m
Número de paquetes por cada haz de protones	2808
Número de protones por paquete	1.15×10^{11}
Haces de protones	
Energía de los protones	7.00 TeV
Energía de centro de masa	14.0 TeV

Tabla 1: Valores numéricos típicos de algunos parámetros relevantes del LHC.

Los físicos de partículas utilizan unidades convenientes de energía, momento y masa.

La energía se mide en electronvoltios [eV]. Por definición, 1 eV es la cantidad de energía ganada por una partícula con la carga elemental, e , al atravesar una diferencia de potencial de un voltio ($1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2}$).

El momento se mide en unidades de eV/c y la masa en eV/c^2 , donde c es la velocidad de la luz en el vacío. Como 1 eV es una cantidad de energía muy pequeña, los físicos de partículas utilizan normalmente MeV ($1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$), GeV ($1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$) o TeV ($1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$).

La PARTE A trata sobre la aceleración de protones y electrones. La PARTE B se dedica a la identificación de las partículas producidas en las colisiones en el CERN.

PARTE A. El acelerador LHC (6 puntos)

ACELERACIÓN:

Suponemos que los protones son acelerados por un voltaje V tal que la velocidad alcanzada es próxima a la de la luz, e ignoramos cualquier pérdida de energía debida a radiación o colisión con otras partículas.

A.1	Obtenga la expresión exacta para la velocidad final v de los protones, en función del voltaje de aceleración V y de constantes físicas.	0.7pt
------------	---	-------

Se ha diseñado un futuro experimento en el CERN que proyecta usar los protones del LHC para producir colisiones con electrones de 60.0 GeV de energía.

- A.2** Para partículas de alta energía y baja masa, la desviación relativa $\Delta = (c - v)/c$ de la velocidad final v con respecto a la velocidad de la luz, es muy pequeña. Encuentre una aproximación de primer orden para Δ y calcule Δ para electrones con energía de 60.0 GeV utilizando el voltaje de aceleración V y constantes físicas. 0.8pt

Volvemos ahora a los protones en el LHC. Suponga que el túnel del acelerador es circular.

- A.3** Deduzca una expresión para la densidad uniforme de flujo magnético B , necesaria para mantener el haz de protones en una trayectoria circular. La expresión solo debe contener: la energía de los protones E , el perímetro de la circunferencia L , constantes fundamentales y constantes numéricas. Se pueden utilizar aproximaciones adecuadas si el efecto es menor que la precisión dada por el número de cifras significativas. Calcule la densidad de flujo magnético B para una energía de los protones de $E = 7.00$ TeV, despreciando las interacciones entre los protones. 1.0pt

POTENCIA RADIADA:

Una carga acelerada irradia energía en forma de ondas electromagnéticas. La potencia radiada P_{rad} por una partícula cargada que se mueve a velocidad angular constante, depende sólo de su aceleración a , su carga q , la velocidad de la luz c y la permitividad del vacío ϵ_0 .

- A.4** Mediante análisis dimensional, encuentre una expresión para la potencia radiada P_{rad} . 1.0pt

La fórmula exacta para la potencia radiada incluye un factor $1/(6\pi)$. Además, la derivación relativista incluye un factor multiplicativo adicional γ^4 , con $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-\frac{1}{2}}$.

- A.5** Calcule P_{tot} , la potencia radiada total del LHC, para una energía del protón de $E = 7.00$ TeV (ver Tabla 1). Se pueden hacer aproximaciones adecuadas. 1.0pt

ACELERACIÓN LINEAL:

En el CERN, los protones en reposo se aceleran por un acelerador lineal de longitud $d = 30.0$ m mediante una diferencia de potencial $V = 500$ MV. Suponga que el campo eléctrico es homogéneo. Un acelerador lineal consiste en dos placas como se ilustra en la Figura 1.

- A.6** Determine el tiempo T que emplean los protones en cruzar este campo. 1.5pt

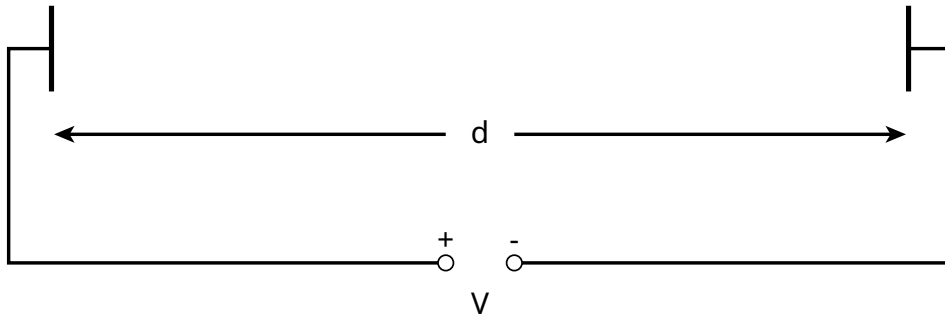


Figura 1: Dibujo de un módulo del acelerador.

PARTE B. Identificación de las partículas (4 puntos)

TIEMPO DE VUELO:

Para interpretar los procesos de interacción, es importante identificar las partículas de alta energía que se generan en la colisión. Un método sencillo consiste en medir el tiempo t que una partícula con momento conocido necesita para recorrer una longitud l en un detector llamado "de tiempo de vuelo" (ToF, del inglés *Time of Flight*). En la Tabla 2 se indican algunas de las partículas más habituales identificadas con este detector.

Partícula	Masa [MeV/c^2]
Deuterón	1876
Protón	938
Kaón cargado	494
Pión cargado	140
Electrón	0.511

Tabla 2: Partículas y sus masas.

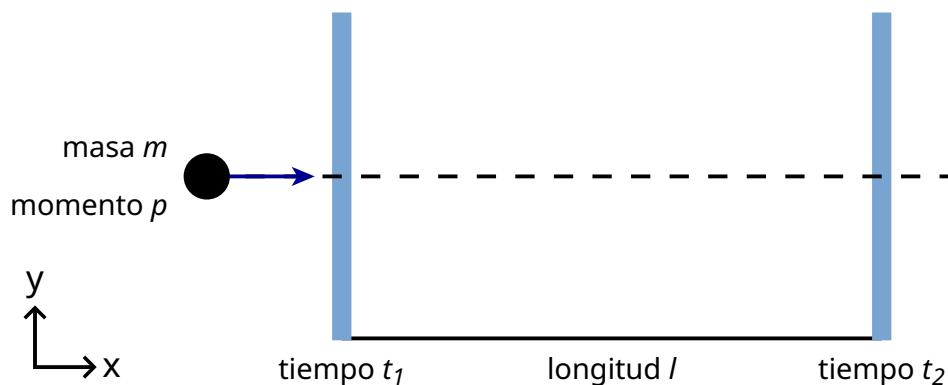


Figura 2: Representación esquemática de un detector de tiempo de vuelo (ToF).

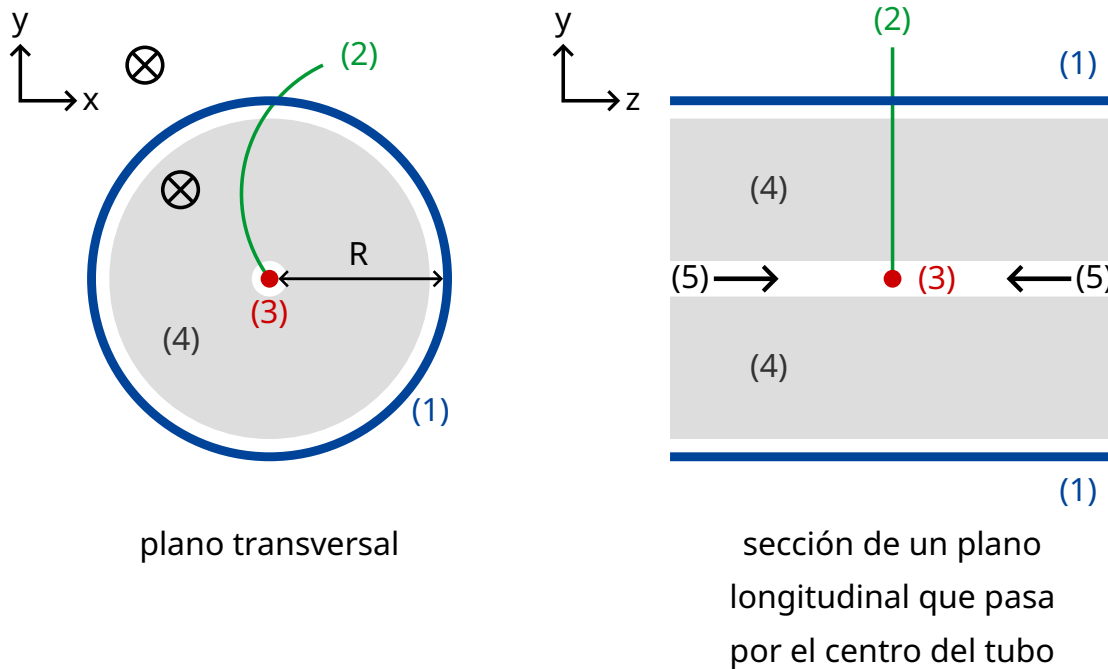
- B.1** Exprese la masa en reposo m de la partícula en función del momento p , la longitud de vuelo l y el tiempo de vuelo t , suponiendo que las partículas tienen carga elemental e , viajan a una velocidad próxima a c en trayectorias rectilíneas en el detector ToF, y que viajan en dirección perpendicular a los dos planos de detección (vea la Fig. 2). 0.8pt

- B.2** Calcule la longitud mínima l de un detector ToF que permita distinguir claramente entre un pión cargado y un kaón cargado, cuyos momentos medidos son ambos de $1.00 \text{ GeV}/c$. Para una buena distinción se requiere que la diferencia en tiempo de vuelo sea tres veces mayor que la resolución temporal del detector. La resolución temporal típica de un detector ToF es de 150 ps ($1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$). 0.7pt

En lo que sigue, consideramos partículas producidas en el LHC que son identificadas en un detector de dos etapas constituido por la combinación de un detector de seguimiento y un detector ToF. La Figura 3 muestra el montaje en el plano transversal y longitudinal a los haces de protones. Los dos detectores están compuestos por tubos que rodean la zona de interacción, con el haz pasando por el centro de los tubos.

El detector de seguimiento mide la trayectoria de una partícula cargada que atraviesa un campo magnético cuya dirección es paralela a los haces de protones. El radio r de la trayectoria nos permite determinar el momento transversal p_T de la partícula. Como el tiempo de colisión es conocido, el detector ToF sólo necesita un tubo para medir el tiempo de vuelo, que se mide desde el punto de colisión al tubo ToF. Este tubo del ToF está situado justo fuera de la cámara de seguimiento.

Para esta cuestión puede suponer que todas las partículas creadas por la colisión viajan en dirección perpendicular a los haces de protones, lo que implica que las partículas creadas no poseen momento a lo largo de la dirección de los haces de protones.



- (1) - tubo ToF
- (2) - recorrido
- (3) - punto de colisión
- (4) - tubo de seguimiento
- (5) - haces de protones
- ⊗ - campo magnético

Figura 3 : Montaje experimental para la identificación de partículas por medio de una cámara de seguimiento y un detector ToF. Ambos detectores son tubos que circundan al punto de colisión situado en el centro. Izquierda: vista transversal perpendicular al haz. Derecha: vista longitudinal paralela al haz. Las partículas viajan perpendiculares al haz.

B.3 Exprese la masa de la partícula en términos del campo magnético B , el radio R del tubo ToF, constantes fundamentales y las cantidades medidas: radio de la trayectoria r y tiempo de vuelo t . 1.7pt

Hemos detectado cuatro partículas y queremos identificarlas. El campo magnético dentro del detector de seguimiento fue $B = 0.500$ T. El radio R del tubo ToF fue de 3.70 m. A continuación están los resultados de las medidas ($1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$):

Partícula	Radio de la trayectoria r [m]	Tiempo de vuelo t [ns]
A	5.10	20
B	2.94	14
C	6.06	18
D	2.31	25

B.4 Identifique las cuatro partículas mediante el cálculo de sus masas.

0.8pt