

El Gran Colisionador de Hadrones (LHC) (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. Su objetivo principal es dilucidar las leyes fundamentales de la naturaleza. La base del funcionamiento 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. 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 nominal de los protones	7.00 TeV
Energía de centro de masa (colisión)	14.0 TeV

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

Los físicos de partículas utilizan unas unidades más convenientes de energía, momento y masa. La energía se mide en electrón voltios [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.

- | | |
|--|-------|
| <p>A.1 Encuentre una expresión para la velocidad final v de los protones, en función del voltaje de aceleración V, y de constantes físicas fundamentales.</p> | 0.7pt |
|--|-------|

Hay un diseño de un futuro experimento en el CERN que planea usar los protones del LHC para producir colisiones con electrones con una energía de 60.0 GeV.

- A.2** Para las partículas de alta energía y baja masa en reposo, la desviación relativa $r = (c - v)/c$ de la velocidad final v con respecto a la velocidad de la luz es pequeña. Encuentre una aproximación adecuada para r y calcule r para electrones con energía de 60.0 GeV. usando del voltaje de aceleración V , y de constantes físicas fundamentales. 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 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. 1.0pt

Potencia Radiación

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 adicional γ^4 , con $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-\frac{1}{2}}$.

- A.5** Calcule la potencia radiada total P_{tot} 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 son acelerados 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. El acelerador lineal consiste en dos placas como se muestra en la Figura 1.

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

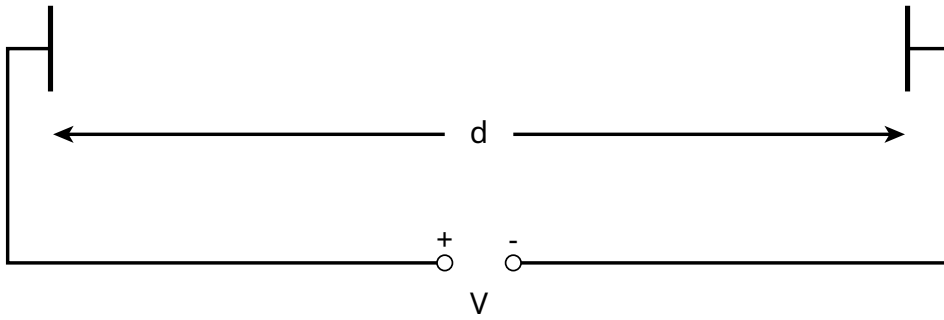


Figura 1: Dibujo de un módulo del acelerador.

Parte B. Identificación de Partículas (4 puntos)

Tiempo de vuelo:

Para interpretar los procesos de interacción, es importante identificar las partículas que se generan en la colisión. Un método sencillo consiste en medir el tiempo t que una partícula con momento conocido requiere para viajar 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
Carga del Kaon	494
Carga del Pion	140
Electrón	0.511

Tabla 2: Partículas y sus masas.

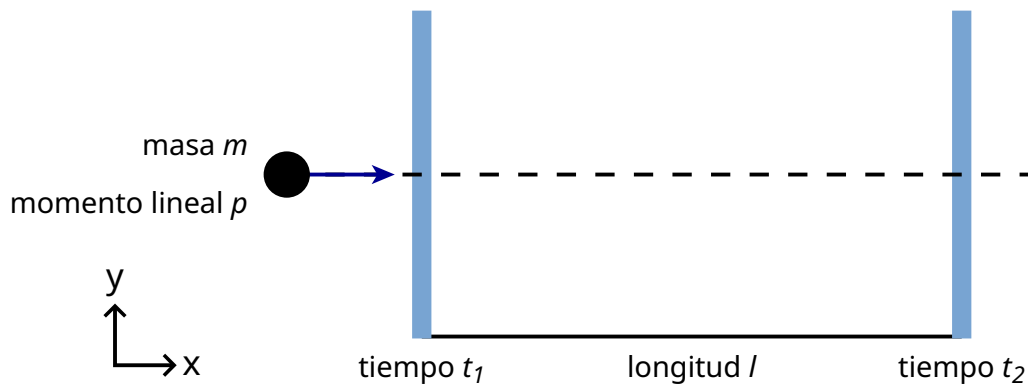


Figura 2: Representación esquemática de un detector de tiempo de vuelo (ToF).

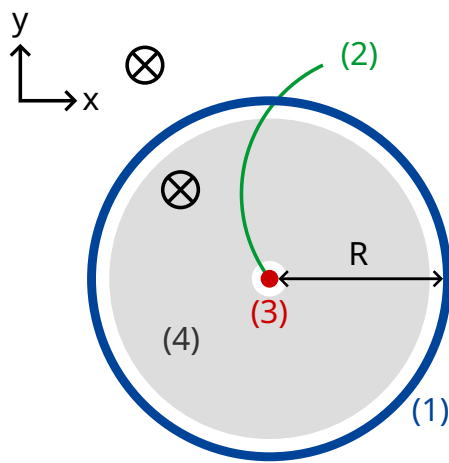
- B.1** Exprese la masa en reposo m de la partícula en función del momento p , la longitud de vuelo l y el tiempo de vuelo t , suponiendo que las partículas con carga elemental e viajan a alta velocidad en trayectorias rectilíneas en el detector ToF y que viajan en dirección perpendicular a los dos planos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

- B.2** Calcule la longitud l de un detector ToF que permita distinguir claramente entre un pión y un kaón 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

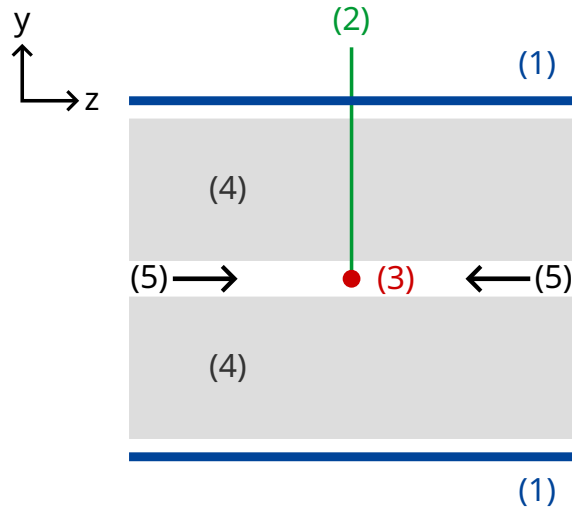
En lo que sigue, consideramos partículas producidas en el LHC que son identificadas en un detector de dos etapas constituido por la combinación de un detector de seguimiento y un detector ToF. La Figura 3 muestra el montaje en el plano transversal y longitudinal a los haces de protones. Los dos detectores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

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 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. Este tubo del ToF está situado justo después 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 longitudinal.



plano transversal



Sección Transversal de
vista longitudinal en el centro
a lo largo de los haces

- (1) - tubo ToF
- (2) - trayectoria
- (3) - punto de colisión
- (4) - detector 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 función de la densidad de flujo 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 diferentes y queremos identificarlas. La densidad de flujo 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