

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

Por favor asegúrese de leer las instrucciones generales dentro del sobre adjunto antes de comenzar a resolver este problema.

En esta tarea discutiremos la física del acelerador de partículas LHC (Large Hadron Collider) en el CERN. CERN es el mayor laboratorio de física de partículas del mundo. Su objetivo principal es obtener un amplio conocimiento de las leyes fundamentales de la naturaleza. Dos haces de partículas son aceleradas a altas energías, guiados alrededor del anillo acelerador por un campo magnético fuerte y luego colisionan entre sí. Los protones no están esparcidos uniformemente en la circunferencia del acelerador sino que están agrupados en lo que se llama paquetes. Las partículas generadas por estas colisiones son luego observadas por grandes detectores.

Algunos parámetros del LHC se encuentran en la tabla 1.

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

Tabla 1: Valores numéricos típicos de parámetros relevantes para el LHC.

Los físicos de partículas usan unidades de energía, momento y masa convenientes: la energía se mide en electrón voltios [eV]. Por definición, 1 eV es la cantidad de energía ganada por una partícula con una carga elemental, e , al cruzar 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. Ya que 1 eV es una unidad de energía muy pequeña, los físicos de partículas usualmente usan MeV ($1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$), GeV ($1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$) or TeV ($1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$).

La parte A trata de la aceleración de protones o electrones. La parte B se concentra a la identificación de las partículas producidas en las colisiones en el CERN.

Parte A. El acelerador LHC (6 puntos)

Aceleración:

Asumimos que los protones son acelerados por un voltaje V tal que su velocidad es muy cercana a la de la luz e ignoramos cualquier pérdida de energía debido a radiación o colisión con otras partículas.

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

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

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

Volvemos ahora a los protones en el LHC. Asuma que el túnel del acelerador forma un círculo.

- 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 , la circunferencia L , constantes fundamentales y no fundamentales. Es posible utilizar aproximaciones adecuadas si su efecto es menor que la precisión propuesta por el menor número de dígitos significativos. 1.0pt
 Calcule la densidad de flujo magnético B para una energía de los protones de $E = 7.00$ TeV despreciando interacciones entre los protones.

Potencia radiada

Una partícula cargada que tiene aceleración no nula irradia energía en forma de ondas electromagnéticas. La potencia radiada P_{rad} de una partícula cargada que circula a velocidad angular constante, depende únicamente de su aceleración a , su carga q , la velocidad de la luz c y la permitividad del vacío ϵ_0 .

- A.4** Use análisis dimensional para encontrar una expresión para la potencia radiada P_{rad} . 1.0pt

La formula real incluye un factor adicional de $1/(6\pi)$; además, una derivación relativista incluye un factor 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 de proton de $E = 7.00$ TeV (Ver tabla 1). Es posible utilizar 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 a través de una diferencia de potencial de $V = 500$ MV. Asuma que el campo eléctrico es homogéneo. Un acelerador lineal consiste de dos placas como se muestra en la Figura 1.

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

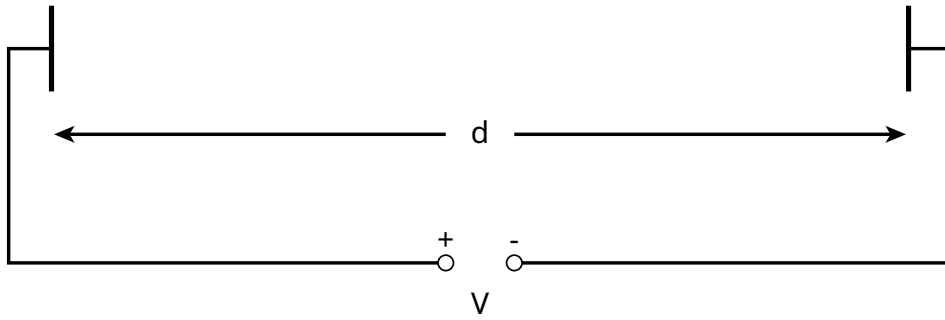


Figura 1: Dibujo de un módulo acelerador.

Parte B. Identificación de partículas (4 puntos)

Tiempo de vuelo:

Es importante identificar las partículas de altas energías que se generan en la colisión para poder interpretar el proceso de interacción. Un método simple es, medir el tiempo t que una partícula con momento conocido requiere para viajar una longitud l , en un detector denominado tiempo de vuelo (ToF, del inglés Time of Flight). Las partículas identificadas típicamente con este detector, junto con sus masas, se encuentran en la tabla 2.

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

Tabla 2: Partículas y sus masas.

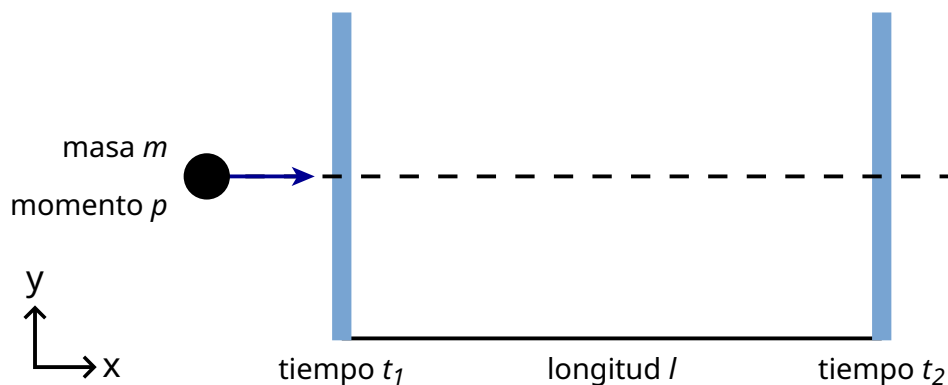


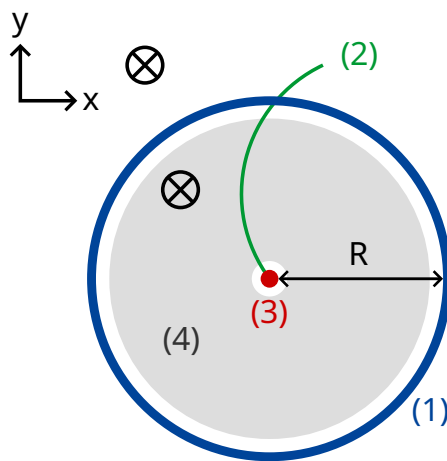
Figura 2: Representación esquemática de un detector de tiempo de vuelo (ToF).

- B.1** Exprese la masa m de la partícula en términos del momento p , la longitud de vuelo l y el tiempo de vuelo t asumiendo que las partículas tienen una carga elemental e y viajan con velocidad cercana a c sobre trayectorias lineales en el detector ToF y que viajan en dirección ortogonal a los dos planos de detección (vea la figura 2). 0.8pt

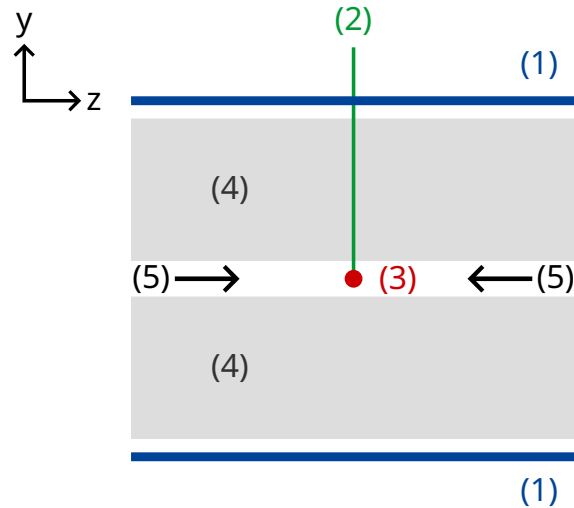
- B.2** Calcule la longitud mínima l de un detector ToF que permite distinguir claramente entre un pión cargado y un kaón cargado, considerando que sus momentos medidos son ambos de $1.00 \text{ GeV}/c$. Para una buena distinción se requiere que la diferencia en tiempo de vuelo sea tres veces mayor que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

En lo que sigue, partículas producidas en un detector del LHC son detectadas en un detector de dos etapas, constituido por un detector de seguimiento y un detector ToF. La Figura 3 muestra el montaje en el plano transversal y longitudinal de los haces de protones. Ambos detectores están compuestos por tubos que rodean la zona de interacción donde el haz pasa entre 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 permite determinar el momento transversal p_T de la partícula. Ya que el tiempo de colisión es conocido, el detector ToF solo necesita un tubo para medir el tiempo de vuelo que se mide desde el punto de colisión al tubo ToF. Este tubo ToF está situado justo afuera de la cámara de seguimiento. Para esta tarea puede asumir que las partículas creadas por la colisión viajan en dirección perpendicular al haz de protones. Esto quiere decir que las partículas creadas no poseen momento a lo largo de la dirección de los haces de protones.



Plano transversal



Sección transversal de la
vista longitudinal en el centro
a lo largo del haz en el tubo

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

Figura 3 : Arreglo experimental para la identificación de partículas por medio de una cámara de seguimiento y un detector ToF. Ambos detectores son tubos que rodean el punto de colisión, situado en el centro. Izquierda: vista transversal perpendicular al haz. Derecha: vista longitudinal paralela al haz. La partícula viaja perpendicular al haz.

B.3 Exprese la masa de la partícula en términos 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 y queremos identificarlas. La densidad de flujo magnético dentro del detector de seguimiento fue de $B = 0.500$ T. El radio R del tubo ToF fue de 3.70 m. Aquí están las mediciones ($1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$):

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 calculando sus masas.

0.8pt