

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

Por favor lea las instrucciones generales, que están dentro del sobre adjunto, antes de comenzar este problema.

En este problema discutiremos la física del acelerador de partículas LHC (Large Hadron Collider) en el CERN. El CERN es el mayor laboratorio de física de partículas. Su objetivo principal es dilucidar las leyes fundamentales de la naturaleza. Dos haces de partículas son acelerados a altas energías, guiados alrededor del anillo acelerador por un fuerte campo magnético y luego se hacen colisionar entre sí. Los protones no están distribuidos uniformemente alrededor de la circunferencia del acelerador, pero están agrupados en paquetes. Las partículas resultantes generadas por estas colisiones son observadas con 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 nominal de los protones	7.00 TeV
Energía de centro de masa (colisión)	14.0 TeV

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

Los físicos de partículas utilizan unidades de energía, momento y masa convenientes: la energía se mide en electronvoltios [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 utilizan 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 en la identificación de las partículas producidas en las colisiones en el CERN.

Parte A. El acelerador LHC (6 puntos)

Aceleración:

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

- | | |
|--|-------|
| A.1 Encuentre una expresión para la velocidad final v de los protones, como función del voltaje de aceleración V , y de constantes fundamentales. | 0.7pt |
|--|-------|

Un diseño para un experimento futuro en el CERN planea utilizar los protones del LHC y hacerlos colisionar con electrones con una energía de 60.0 GeV.

- A.2** Para partículas con alta energía y poca masa en reposo, 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 una energía de 60.0 GeV utilizando el voltaje de aceleración V y 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 el campo magnético uniforme B , necesario 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 números. Es posible utilizar aproximaciones apropiadas si su efecto es menor que la precisión propuesta por el menor número de dígitos significativos. 1.0pt
 Calcule el campo magnético B para una energía de los protones de $E = 7.00$ TeV, despreciando las interacciones entre protones.

Potencia radiada

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

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

La verdadera formula para la potencia radiada contiene un factor de $1/(6\pi)$; además, una derivación relativista completa incluye un factor multiplicativo 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 de protón de $E = 7.00$ TeV (Ver tabla 1). Es posible utilizar aproximaciones apropiadas. 1.0pt

Aceleración Lineal:

En el LHC 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.

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

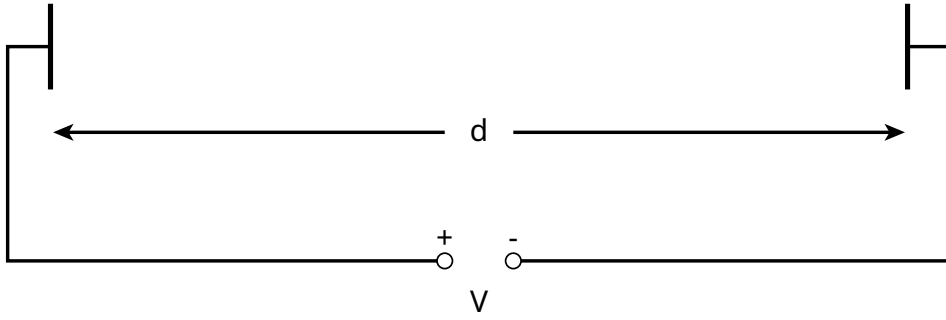


Figura 1: Dibujo de un modulo acelerador.

Parte B. Identificación de las partículas (4 puntos)

Tiempo de vuelo:

Es importante identificar las partículas altamente energéticas 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 denominado detector de tiempo de vuelo (ToF, del inglés Time of Flight). Ejemplos de 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.

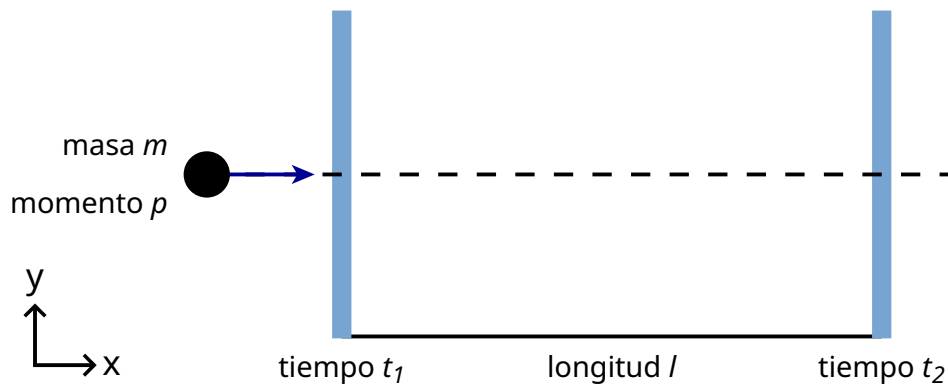
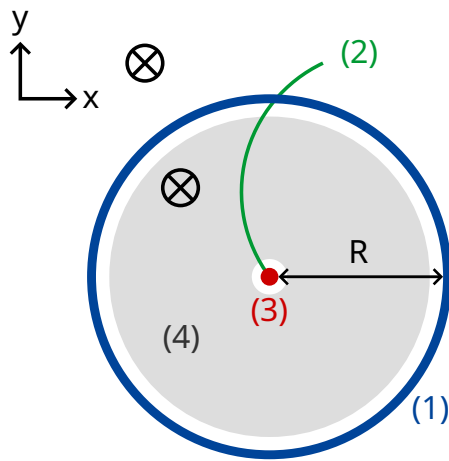


Figura 2: Representación esquemática de un detector de tiempo de vuelo (ToF).

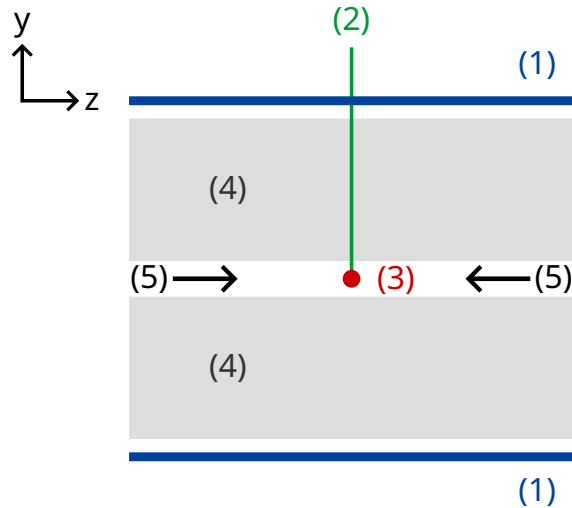
- B.1** Exprese la masa en reposo m de la partícula como función del momento p , la longitud de vuelo l y el tiempo de vuelo t asumiendo que las partículas tienen una carga elemental e y viajan con velocidad cercana a c siguiendo trayectorias en línea recta en el detector ToF y que viajan en dirección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

- B.2** Calcule la mínima longitud l de un detector ToF que permite distinguir claramente entre un káon cargado y un pión 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 identificadas 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 a los haces de protones. Ambos 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 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 (tiempo entre la colisión y la detección en el tubo ToF). Este tubo ToF está situado justo después de la cámara de seguimiento. Para esta tarea puede asumir que todas las partículas creadas por la colisión viajan en dirección perpendicular al haz de protones, eso quiere decir que las partículas creadas no poseen momento en la dirección del haz de protones.



plano transversal



vista longitudinal en el centro
del tubo a lo largo del haz

- (1) - tubo ToF
- (2) - trayectoria
- (3) - punto de colisión
- (4) - tracking detector
- (5) - haz 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 al punto de colisión, situado en el centro. Izquierda: vista transversal perpendicular a la línea del haz. Derecha: vista longitudinal paralela a la línea del haz. La partícula viaja perpendicular a la línea del haz.

B.3 Exprese la masa de la partícula como función 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 diferentes y queremos identificarlas. El campo magnético dentro del detector de seguimiento fue de $B = 0.500$ T. El radio R del plano 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