

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

Asegúrate 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) del CERN. El CERN es el laboratorio de física de partículas más grande del mundo. Su objetivo principal es indagar sobre las leyes fundamentales de la naturaleza. Dos haces de protones son acelerados hasta altas energías, guiadas dentro de un anillo acelerador por medio de un campo magnético intenso, para luego provocar la colisión de dichos haces. Los protones en los haces no están distribuidos uniformemente a lo largo de la circunferencia del acelerador, sino que están distribuidos en paquetes separados. La colisión de los protones genera una multitud de otras partículas que, a su vez, son observadas en grandes detectores. En la tabla 1 se encuentran algunos parámetros del LHC.

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 del centro de masas (colisión)	14.0 TeV

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

Los físicos de partículas usan unidades adecuadas de energía, momento y masa: la energía se mide en electronvolt [eV]. Por definición, 1 eV es la cantidad de energía ganada por una partícula de carga elemental e , al cruzar una diferencia de potencial de un volt ($1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ kg m}^2/\text{s}^2$)

El momento se mide en unidades de eV/c y la masa en unidades de 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 ($1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$) o 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 I:

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

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

En un experimento futuro en el CERN se planea usar los protones del LHC para generar colisiones con electrones tales que estos adquieran una energía de 60.0 GeV.

- A.2** Para partículas con alta energía y baja 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. Encuentra, a primer orden, una aproximación apropiada para Δ y evalúala para electrones con una energía de 60.0 GeV, usando el voltaje de aceleración V y constantes físicas. 0.8pt

Regresemos a los protones en el LHC. Considera que el tubo del acelerador es de forma circular.

- A.3** Deduce una expresión para el campo magnético B , cuyo flujo a través del anillo es uniforme, necesario para mantener un haz de protones en una trayectoria circular. La expresión solo debe incluir la energía cinética de los protones E , la circunferencia L del anillo, constantes fundamentales y números. Puedes utilizar aproximaciones adecuadas si el error debido a esto, es menor que la precisión dada por el menor número de dígitos significativos. Calcula el campo magnético B para una energía cinética de los protones de $E = 7.00$ TeV, despreciando la interacción entre los protones del haz. 1.0pt

Potencia radiada

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

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

La formula real de la potencia radiada de una partícula que circula con una velocidad angular constante, incluye un factor adicional de $1/(6\pi)$. Por otro lado, una deducción relativista introduce aún otro factor adicional dado por γ^4 , con $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-\frac{1}{2}}$.

- A.5** Calcula la potencia total radiada P_{tot} del LHC, para un protón con energía cinética $E = 7.00$ TeV (Ver tabla 1). Utiliza aproximaciones adecuadas. 1.0pt

Aceleración lineal:

En el colisionador del LHC, los protones en reposo son acelerados a través de un acelerador lineal de longitud $d = 30.0$ m cuya diferencia de potencial es de $V = 500$ MV. Considera que el campo eléctrico es homogéneo. Un acelerador lineal consiste de dos placas, separadas una distancia d , como se muestra en la Figura 1.

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

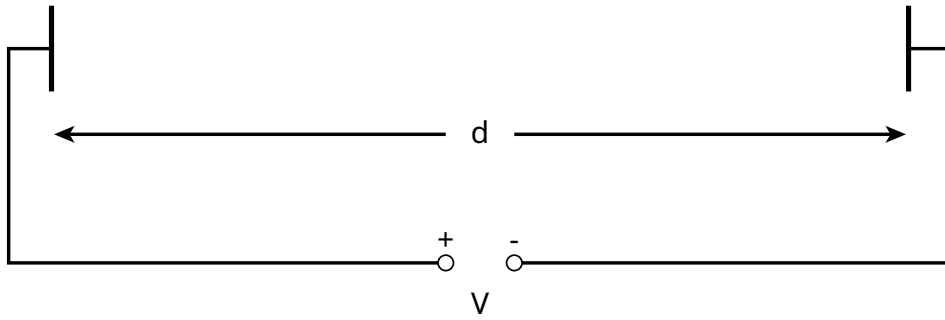


Figura 1: Diagrama de un módulo de acelerador lineal.

Parte B. Identificación de las partículas (4 puntos)

Tiempo de vuelo:

Para interpretar el proceso 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 requiere una partícula con momento conocido para viajar una longitud l en un detector denominado de "tiempo de vuelo" (ToF por sus siglas en inglés). En la tabla 2 se listan partículas típicas, y sus masas, 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.

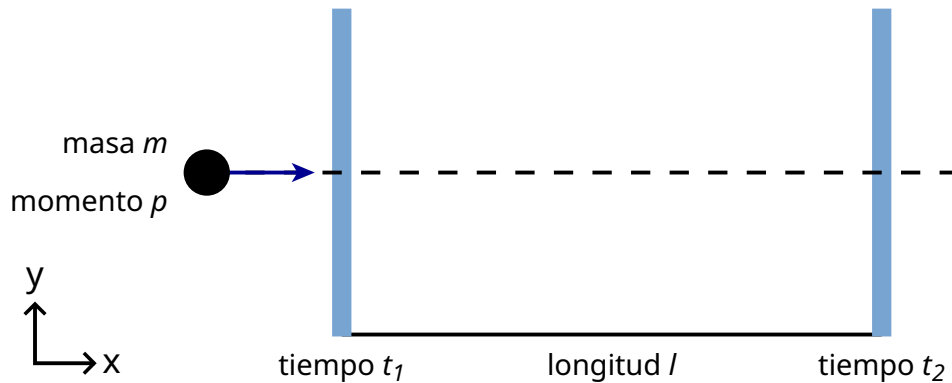
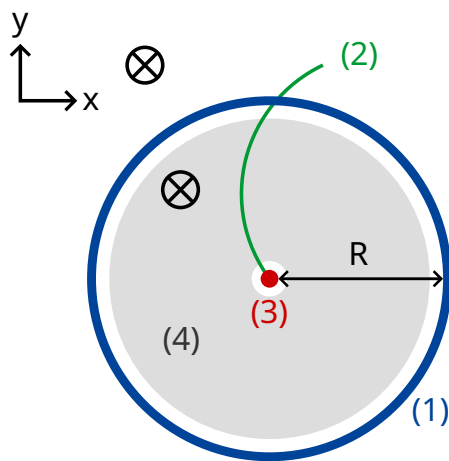


Figure 2: Representación esquemática de un detector de tiempo de vuelo (ToF).

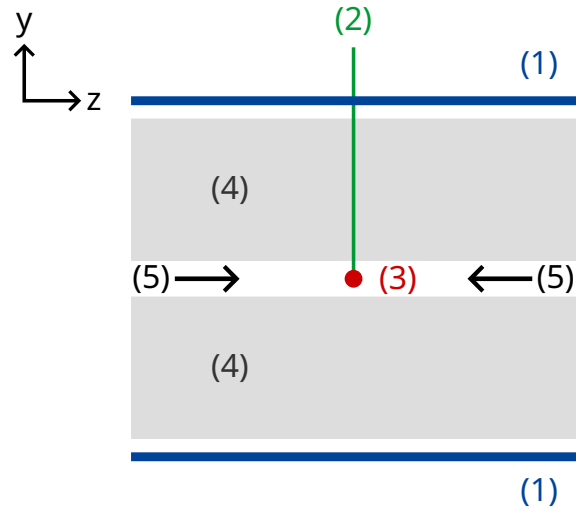
- B.1** Expresa la masa en reposo m de la partícula como función del momento p , de la longitud de vuelo l y del tiempo de vuelo t , suponiendo que las partículas tienen carga elemental e y que viajan a gran velocidad siguiendo trayectorias rectas en el detector ToF. Considera también que las partículas viajan en dirección ortogonal a los dos planos de detección (ver la figura 2). 0.8pt

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

En adelante, las partículas producidas en el LHC son registradas por un sensor de dos etapas constituido por un detector o cámara de traza y un detector ToF. La Figura 3 muestra el montaje en los planos transversal y longitudinal a los haces de protones. Ambos detectores están compuestos por tubos que rodean la zona de interacción, con lo hace viajando a lo largo del eje de los tubos. El detector de traza registra 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. Debido a que se conoce el instante de la colisión, el detector ToF sólo necesita un tubo para medir el tiempo de vuelo (es decir, el tiempo entre la colisión y la detección en el detector ToF con forma de tubo). Este tubo ToF está situado justo después de la cámara de traza. Para esta tarea puedes suponer que las partículas creadas en la colisión sólo viajan en el plano perpendicular a los haces de protones. Esto significa que las partículas creadas no tienen momento a lo largo de la dirección de los haces.



plano transversal



sección transversal de la
vista longitudinal
a lo largo de la línea de los haces

- (1) - tubo ToF
- (2) - trayectoria o traza
- (3) - punto de colisión
- (4) - detector o cámara de traza
- (5) - haces de protones
- ⊗ - magnetic field

Figura 3 : Arreglo experimental para la identificación de partículas por medio de una cámara de traza y un detector ToF. Ambos detectores son tubos que rodean el punto de colisión situado en el centro. Izquierda: vista transversal perpendicular a la línea de los haces. Derecha: vista longitudinal paralela a la línea de los haces. Las partículas generadas viajan perpendicular a la línea de los haces.

B.3 Expresa la masa de una partícula creada como función del campo magnético B , del radio R del tubo ToF, de constantes fundamentales y de las cantidades medidas: radio de la trayectoria r y tiempo de vuelo t . 1.7pt

Se han detectado cuatro partículas diferentes y queremos identificarlas. El campo magnético dentro del detector de traza fue de $B = 0.500$ T. El radio R del tubo ToF fue de 3.70 m. A continuación se dan las mediciones realizadas ($1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$):

Partícula	Radio r [m]	Tiempo de vuelo t [ns]
A	5.10	20
B	2.91	14
C	6.06	18
D	2.31	25

B.4 Identifica las cuatro partículas calculando sus masas.

0.8pt