

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

Por favor asegúrese de leer las instrucciones generales del sobre adjunto antes de comenzar a resolver 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 del mundo. 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 campo magnético fuerte y luego colisionados entre sí. Las partículas que colisionan (generalmente protones) no viajan dispersas uniformemente en el anillo del acelerador, sino que son agrupados en lo que podrían denominarse "racimos" o "paquetes" de partículas (en inglés: bunches). Luego, las partículas que resultan de estas colisiones son 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 (racimos) 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 de 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 electronvoltios [eV]. Por definición, 1 eV es la cantidad de energía ganada por una partícula con 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 generalmente usan MeV (1 MeV = 10^6 eV), GeV (1 GeV = 10^9 eV) o TeV (1 TeV = 10^{12} eV).

La parte A del problema trata de la aceleración de protones o electrones. La parte B se concentra en la identificación de las partículas producidas en las colisiones del 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 colisiones 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 físicas fundamentales. | 0.7pt |
|--|-------|

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

- A.2** Para partículas a 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 pequeña. Encuentre una aproximación de 1er orden para Δ y calcule Δ para electrones con una energía de 60.0 GeV usando el voltaje acelerador V y constantes físicas. 1.0pt

Volvemos ahora a los protones en el LHC. Asuma que el túnel del acelerador tiene forma circular.

- A.3** Deduzca una expresión para la densidad de flujo magnético B , uniforme, necesaria para mantener el haz de protones en una trayectoria circular. La expresión sólo debe contener la energía de los protones E , la longitud de la circunferencia L y constantes fundamentales. Es posible utilizar aproximaciones apropiadas si su efecto es menor que la precisión dada 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 con 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 solo 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 para la potencia radiada incluye un factor adicional de $1/(6\pi)$; más aun, una derivación relativista incluye un factor 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

Acceleración 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 en dos placas como se esquematiza en la Figura 1.

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

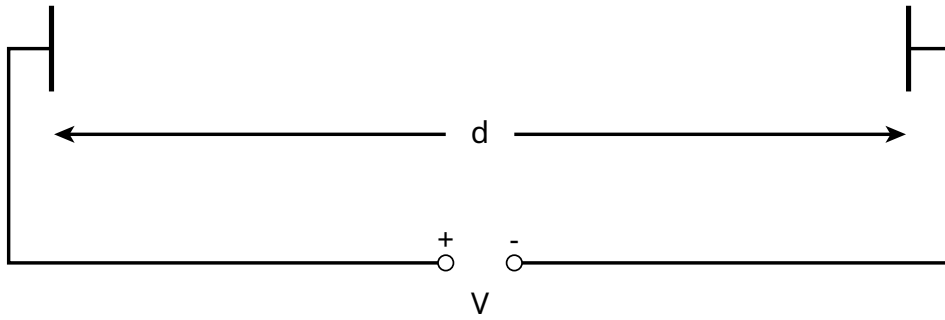


Figura 1: Esquema de un módulo de acelerador lineal.

Parte B. Identificación de partículas (4 puntos)

Tiempo de vuelo:

Es importante identificar las partículas de alta energía 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 típicas identificadas 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.

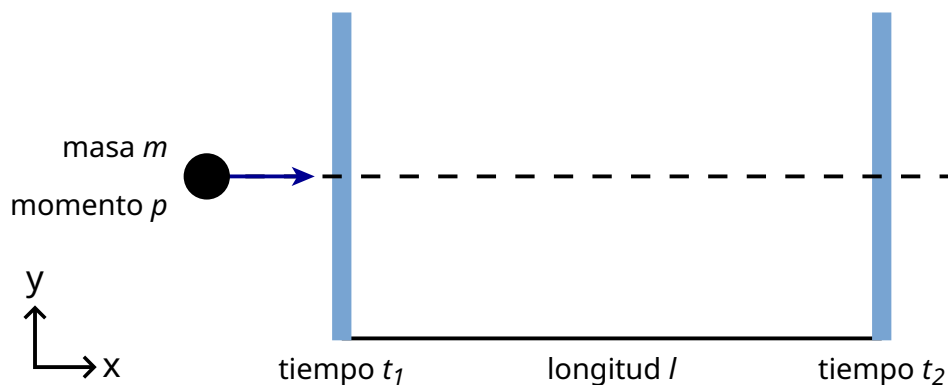


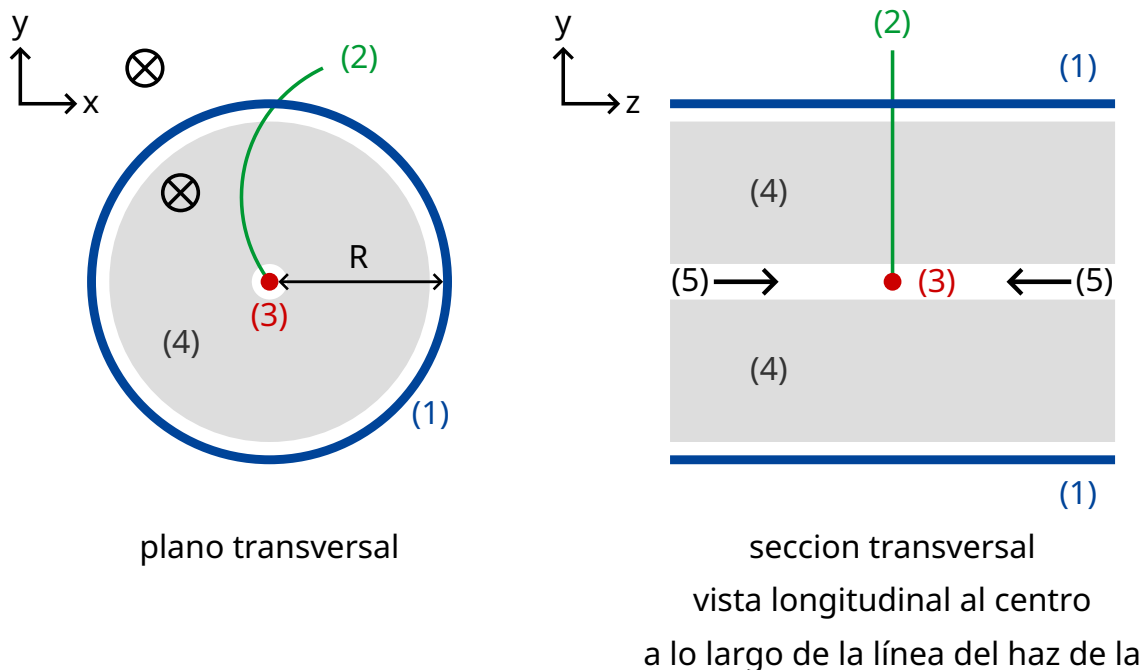
Figura 2: Representación esquemática de un detector de tiempo de vuelo (ToF).

- B.1** Exprese la masa m de la partícula como función del momento p , la longitud de vuelo l y el tiempo de vuelo t , asumiendo que las partículas tienen carga elemental e , que viajan con velocidad próxima a la de la luz siguiendo 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 l mínima 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 temporal 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, ciertas 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 de los haces de protones. Ambos detectores son tubos que rodean la zona de interacción, con el haz pasando por el medio 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 que es medido desde el punto de colisión al detector ToF. Este tubo ToF está situado justo después 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. Eso quiere decir que las partículas creadas no poseen momento a lo largo de la dirección del haz de protones.



- (1) - tubo ToF
- (2) - trayectoria
- (3) - punto de colisión
- (4) - detector de trayectoria
- (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 circundan al 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 Expresar la masa de la partícula como 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 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