

LHC - Grande Colisor de Hádrons (10 pontos).

Por favor, leia as instruções gerais que se encontram no envelope separado antes de iniciar este problema.

Neste problema, iremos estudar a física do acelerador de partículas conhecido como LHC (Large Hadron Collider) do CERN. O CERN é considerado o maior laboratório de física de partículas do mundo. O principal objetivo deste laboratório é obter ideias intuitivas (estalos) sobre as leis fundamentais da natureza. O funcionamento deste equipamento consiste em acelerar dois feixes de partículas até atingirem altas energias no interior de um anel do acelerador por meio de um campo magnético de alta intensidade e, em seguida, realizar colisões destas partículas umas com as outras. Os prótons não estão distribuídos uniformemente ao longo da circunferência no LHC, mas estão agrupados em pacotes de prótons. As partículas resultantes destas colisões são observadas com a utilização de grandes detectores. A seguir alguns parâmetros do LHC apresentados na Tabela 1.

Anel do LHC	
Circunferência do anel	26659 m
Número de pacotes por feixe	2808
Número de prótons por pacote	1.15×10^{11}
Feixe de prótons	
Energia nominal dos prótons	7.00 TeV
Energia no Centro de massa	14.0 TeV

Tabela 1: Valores numéricos dos parâmetros relevantes do LHC.

Os físicos de partículas costumam utilizar algumas unidades mais convenientes para as grandezas de energia, força e massa: para a energia utilizam como medida o elétron-volts eV. Por definição, 1 eV, é a quantidade de energia adquirida por uma partícula com carga elementar e , movida através de uma diferença de potencial de um volt ($1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ kg m}^2/\text{s}^2$).

O momento linear, por sua vez é representado por unidades de eV/c , enquanto a massa é representada em unidades de eV/c^2 , onde c é a velocidade da luz no vácuo. Como 1 eV corresponde a uma quantidade de energia muito pequena, costuma-se expressar esta grandeza por meio de potências, tais como MeV ($1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$), GeV ($1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$) ou TeV ($1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$).

O problema está subdividido em duas partes: a Parte A irá trabalhar com a aceleração de prótons ou elétrons, enquanto na Parte B, trataremos da identificação das partículas produzidas nas colisões no CERN.

Parte A. O acelerador de partículas LHC (6 pontos)

Aceleração I:

Admita que os prótons sejam acelerados por um tensão V de tal forma que a sua velocidade esteja bem próxima da velocidade da luz c , ainda, desconsidere qualquer perda de energia devido à radiação ou colisões com as outras partículas.

- | | | |
|------------|---|-------|
| A.1 | Encontre uma expressão para a velocidade final v dos prótons em função da tensão de aceleração V e das constantes fundamentais. | 0.7pt |
|------------|---|-------|

Um projeto futuro do CERN prevê a realização de colisões utilizando os prótons do LHC com elétrons a uma energia de 60.0 GeV.

- A.2** Para partículas com altas energia e pequena massa de repouso, o desvio $\Delta = (c - v)/c$ da sua velocidade final v e da velocidade da luz é muito pequeno. Encontre uma aproximação de primeira ordem para o desvio Δ e calcule o valor de Δ para os elétrons com uma energia de 60.0 GeV e utilizando a diferença de potencial de aceleração V as constantes físicas. 0.8pt

Agora retornaremos ao estudo dos prótons no LHC. Admita que o tubo de feixe tenha uma forma circular.

- A.3** Deduza uma expressão para a densidade de fluxo magnético uniforme B necessária para manter o feixe de prótons em uma trajetória circular. A expressão deverá conter apenas a energia dos prótons E , o comprimento da circunferência L , as constantes e as grandezas fundamentais. Você poderá utilizar aproximações adequadas caso o resultado produzido seja menor do que a precisão dada pelo número mínimo de algarismos significativos. Calcule a densidade de fluxo magnético B para uma energia de prótons de $E = 7.00$ TeV. Desprezando as interações entre os prótons. 1.0pt

Potência Irradiada:

Uma partícula carregada eletricamente e acelerada irradia energia sob a forma de ondas eletromagnéticas. A potência irradiada de uma partícula carregada P_{rad} que em movimento circular possui uma velocidade angular constante depende apenas da sua aceleração a , da sua carga q , da velocidade da luz c e da permissividade do vácuo ϵ_0 .

- A.4** Utilizando os conceitos de análise dimensional, encontre uma expressão para a potência irradiada P_{rad} . 1.0pt

A expressão real para a potência irradiada contém um fator de correção $1/(6\pi)$; Além disso, uma dedução relativística completa forneceria um fator adicional γ^4 , com $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-\frac{1}{2}}$.

- A.5** Calcule a potência total irradiada do LHC P_{tot} para uma energia de prótons de $E = 7.00$ TeV (Veja a tabela 1). Você poderá utilizar aproximações adequadas. 1.0pt

Aceleração linear:

No LHC os prótons em repouso são acelerados por um acelerador linear de comprimento igual a $d = 30.0$ m, através de uma diferença de potencial de aceleração $V = 500$ MV. Um acelerador linear consiste de duas placas paralelas como mostrado na Figura 1.

- A.6** Determine o intervalo de tempo necessário T para que os prótons atravessem este campo elétrico na extensão do acelerador. 1.5pt

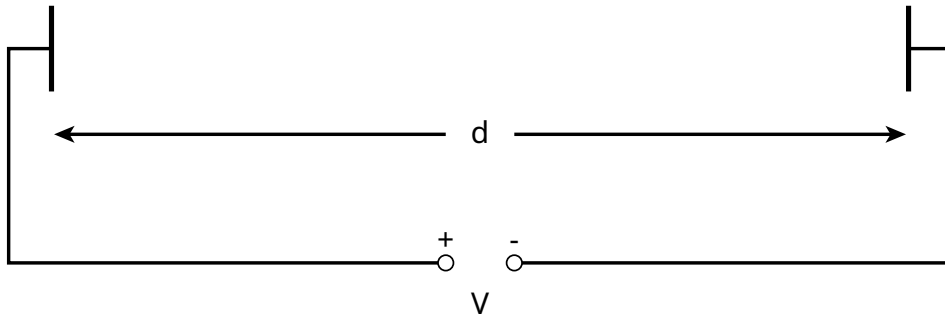


Figure 1: Esquema de um módulo acelerador.

Parte B. Identificação de partículas

Tempo de voo:

É importante identificar as partículas de alta energia que são geradas na colisão para interpretarmos o processo de interação. Um método simples é medir o intervalo de tempo t que a partícula com um momento linear, previamente conhecido, necessário para percorrer um comprimento l , no que chamamos de detector de Tempo de Voo (ToF - Time of Flight). Na tabela 2, a seguir, segue uma lista de partículas típicas que são identificadas no detector e suas respectivas massas.

Partícula	Massa [MeV/c ²]
Deutério	1876
Próton	938
Káon	498
Píon	135
Elétron	0.511

Tabela 2: Partículas e respectivas massas.

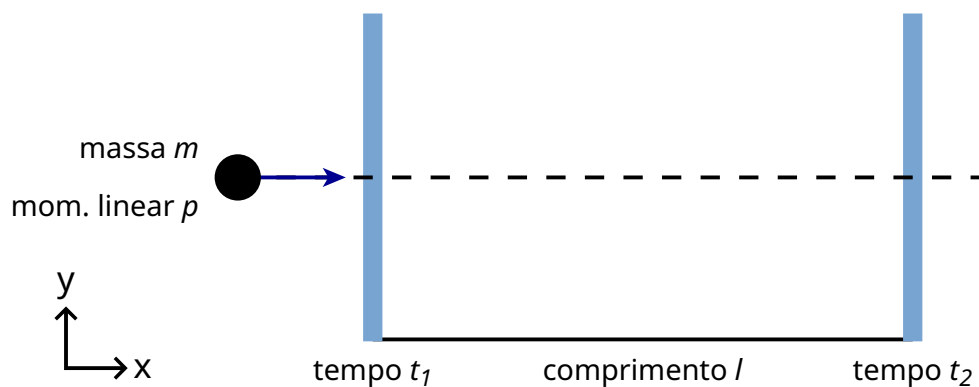
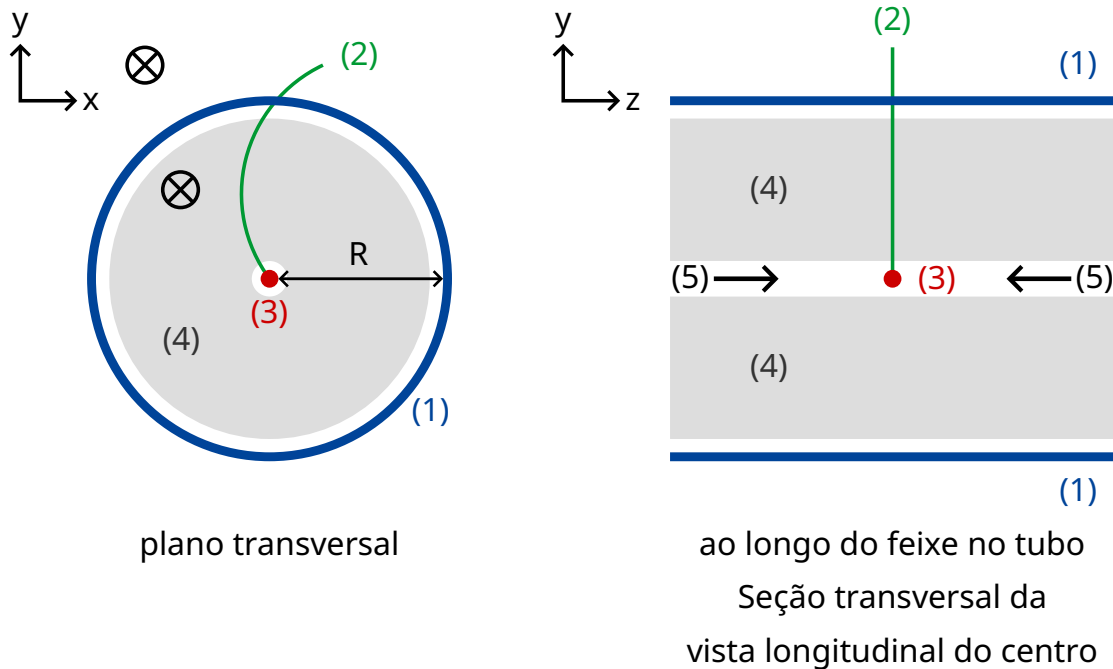


Figura 2: Vista esquemática de um detector de Tempo de Voo.

- B.1** Exprese a massa de repouso m da partícula como função do momento linear p , da distância percorrida l e do tempo de voo t admitindo que as partículas com carga elementar e se movem com velocidades próxima à velocidade da luz em uma trajetória retilínea no detector ToF e que elas se movem na direção perpendicular aos dois planos de detecção (veja a figura 2). 0.8pt

- B.2** Calcule o comprimento mínimo l necessário para que um detector ToF consiga diferenciar com segurança um káon de um pión sabendo que ambos possuem momento linear $1.00 \text{ GeV}/c$. Para uma boa separação é necessário que a diferença no tempo de voo entre as duas partículas seja maior que três vezes a resolução do detector. A resolução típica de um detector ToF é 150 ps ($1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$). 0.7pt

No que se segue, as partículas produzidas num detector do LHC típico são identificadas em um conjunto composto de dois detectores chamados de: câmera de traços e um detector ToF. A figura 3 mostra um arranjo do esquema nos planos transversal e longitudinal ao feixe de prótons. Ambos os detectores são tubos que envolvem a região de interação com os feixes passando no centro dos tubos. A câmera de traços mede a trajetória da partícula eletricamente carregada que atravessa um campo magnético paralelo aos feixes de prótons. O raio r da trajetória nos permite determinar o momento transversal p_T adquirido pela partícula. Como o instante de colisão é conhecido, o detector ToF só precisa de um tubo para medir o tempo de voo, que é medido a partir do ponto de colisão até atingir o tubo de ToF. Este tubo ToF encontra-se localizado na região externa logo depois da câmera de traços. Para esta parte do problema podemos admitir que todas as partículas geradas na colisão viajam perpendicularmente aos feixes de prótons, isto é, não possuem componente longitudinal do momento linear.



- (1) - Tubo ToF
- (2) - Trajetória
- (3) - Ponto de colisão
- (4) - Câmara de traços
- (5) - Feixe de prótons
- ⊗ - Campo magnético

Figura 3 : Arranjo experimental para a identificação de partículas com uma câmara de traços e um detector ToF. Ambos os detectores são tubos que envolvem o ponto de colisão, situado no centro. Esquerda: Vista transversal perpendicular ao feixe. Direita: vista longitudinal paralela ao feixe. A partícula está viajando na direção perpendicular ao feixe.

B.3 Expresse a massa da partícula em função da densidade de fluxo magnético B , do raio R do tubo do detector ToF, das constantes fundamentais e de quantidades medidas: raio r do feixe e tempo de voo t . 1.7pt

Foram detectadas quatro partículas diferentes e será necessário identificá-las. A densidade de fluxo magnético no detector de rastreamento era $B = 0.500$ T. O raio R do ToF era 3.70 m. A seguir as medidas encontradas ($1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$):

Partícula	Raio da trajetória r [m]	Tempo de voo t [ns]
A	5.10	20
B	2.94	14
C	6.06	18
D	2.31	25

B.4 Identifique as quatro partículas através do cálculo das respectivas massas.	0.8pt
--	-------