

## Large Hadron Collider (10 pontos)

Por favor leia as instruções gerais no envelope separado antes de começar este problema.

Nesta tarefa é discutida alguma física do acelerador de partículas LHC (Large Hadron Collider) no CERN. O CERN é o maior laboratório do mundo em física de partículas. Um dos seus principais objetivos é o de obter informação sobre as leis fundamentais da natureza. Dois feixes de prótons são acelerados até altas energias e guiados ao longo do acelerador por um forte campo magnético e então forçados a colidir um com o outro. Os prótons não estão distribuídos uniformemente ao longo da circunferência no LHC, mas estão agrupados em pacotes de prótons. As partículas resultantes das colisões são estudadas com grandes detetores. Alguns parâmetros do LHC podem ser consultados na tabela 1.

<b>Anel LHC</b>	
Perímetro do anel	26659 m
Número de pacotes em cada feixe de prótons	2808
Número de prótons por pacote	$1,15 \times 10^{11}$
<b>Feixes de Prótons</b>	
Energia dos prótons	7,00 TeV
Energia no Centro de Massa	14,0 TeV

Tabela 1: Valores típicos dos parâmetros relevantes do LHC.

Os físicos de partículas usam unidades convenientes para energia, momento linear e massa. A energia é medida em eletrões-volt [eV]. Por definição, 1 eV é a energia ganha por uma partícula com a carga elétrica elementar,  $e$ , que se deslocou ao longo de uma diferença de potencial de um volt ( $1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2}$ ).

O momento linear é medido em unidades de  $eV/c$  e a massa em unidades de  $eV/c^2$ , em que  $c$  é a velocidade da luz no vácuo. Como 1 eV é uma pequena quantidade de energia, os físicos de partículas usam MeV ( $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ ), GeV ( $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$ ) ou TeV ( $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$ ).

A parte A é sobre a aceleração de prótons e de eletrões. A parte B tem a ver com a identificação de partículas produzidas nas colisões no CERN.

### Parte A. Acelerador LHC (6 pontos)

#### Aceleração:

Assuma que os prótons foram acelerados pela diferença de potencial  $V$  de forma a que a sua velocidade seja muito próxima da velocidade da luz no vácuo e despreze as perdas de energia devido à radiação ou colisões com outras partículas.

- |            |  |       |
|------------|--|-------|
| <b>A.1</b> | Obtenha a expressão para a velocidade final $v$ dos prótons em função da diferença de potencial de aceleração $V$ e de constantes físicas. | 0.7pt |
|------------|--|-------|

Uma futura experiência no CERN planeia usar prótons do LHC e colidi-los com eletrões que têm uma energia de 60,0 GeV.

- A.2** Para partículas de alta energia e baixa massa o desvio relativo  $\Delta = (c - v)/c$  da velocidade final  $v$  em relação à velocidade da luz no vázio é muito pequeno. Obtenha uma aproximação de 1ª ordem para  $\Delta$  e calcule  $\Delta$  para eletrões com uma energia de 60,0 GeV, usando a diferença de potencial aceleradora  $V$  e constantes físicas. 0.8pt

Voltemos agora aos protões no LHC. Assuma que o tubo de feixe tem uma forma circular.

- A.3** Obtenha uma expressão para o campo magnético uniforme  $B$  necessário para manter o feixe de protões numa trajetória circular. A expressão deve conter apenas a energia dos protões  $E$ , o perímetro  $L$ , constantes fundamentais e números. Poderá usar aproximações adequadas se os seus efeitos forem mais pequenos do que a precisão dada pelo menor número de algarismos significativos. Calcule o campo magnético  $B$  para um protão de energia  $E = 7,00$  TeV, desprezando as interações entre protões. 1.0pt

### Potência Radiada:

Uma partícula eletricamente carregada e acelerada radia energia na forma de ondas eletromagnéticas. A potência radiada  $P_{\text{rad}}$  duma partícula carregada que circule com velocidade angular constante depende apenas da sua aceleração  $a$ , da sua carga elétrica  $q$ , da velocidade da luz  $c$  e da permitividade elétrica no vázio  $\epsilon_0$ .

- A.4** Use análise dimensional para obter uma expressão para a potência radiada  $P_{\text{rad}}$ . 1.0pt

A fórmula correta para a potência radiada contém um factor  $1/(6\pi)$ ; uma derivação relativista fornece um factor adicional  $\gamma^4$ , com  $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-\frac{1}{2}}$ .

- A.5** Calcule  $P_{\text{tot}}$ , a potência total radiada no LHC tendo os protões uma energia  $E = 7,00$  TeV (conforme tabela 1). Pode usar aproximações adequadas. 1.0pt

### Aceleração linear:

No CERN, protões em repouso são acelerados por um acelerador linear de comprimento  $d = 30,0$  m através de uma diferença de potencial  $V = 500$  MV. Assuma que o campo elétrico é homogéneo. Um acelerador linear consiste em duas placas, como esquematizado na Figura 1.

- A.6** Determine o tempo  $T$  que os protões demoram a atravessar o campo elétrico. 1.5pt

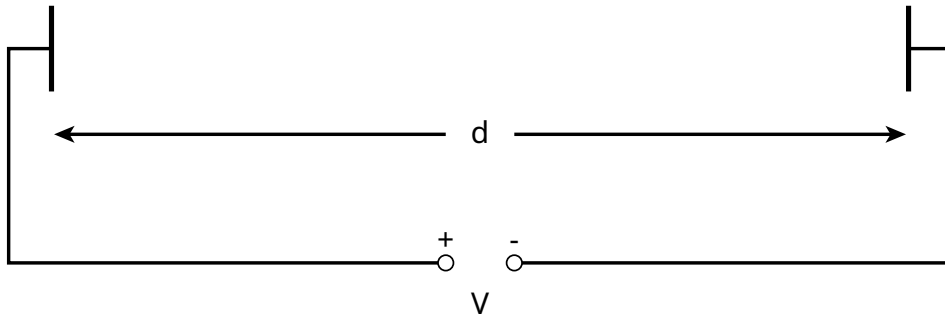


Figura 1: Esquema de um módulo acelerador.

**Parte B. Identificação de Partículas (4 pontos)**

**Tempo de voo:**

A identificação das partículas de alta energia geradas numa colisão é importante para interpretar o processo de interação. Um método simples é a medida do tempo ( $t$ ) que uma partícula com momento linear conhecido leva a percorrer uma distância  $l$  no chamado detetor de tempo de voo (ToF para Time-of-Flight). Algumas partículas que são identificadas no detetor, bem como as respetivas massas, são indicadas na Tabela 2.

Partícula	Massa [MeV/c <sup>2</sup> ]
Deutério	1876
Protão	938
Kaão carregado	494
Piãõ carregado	140
Elétrão	0,511

Tabela 2: Partículas e respetivas massas.

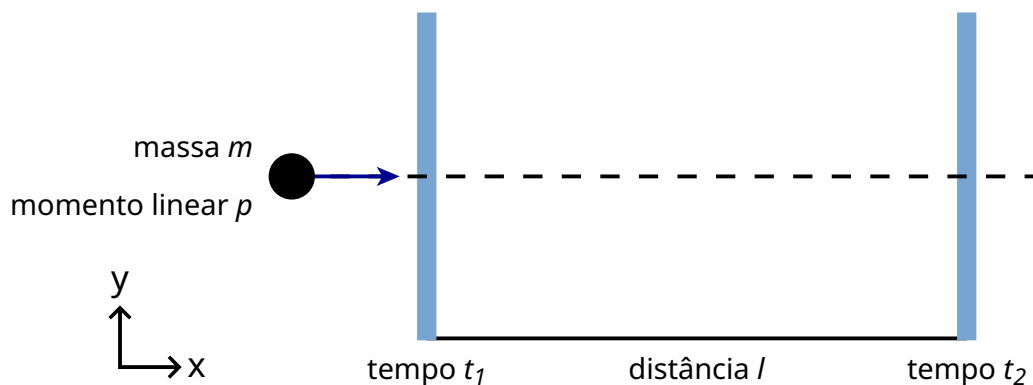
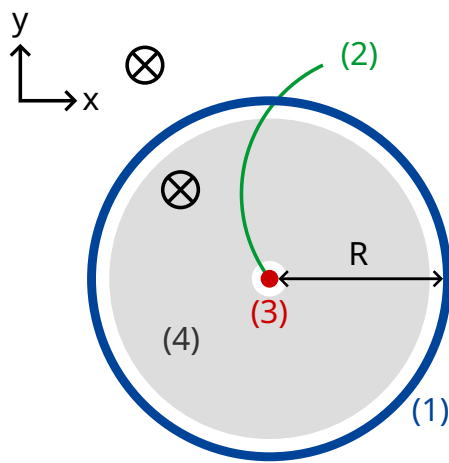


Figura 2: Vista esquemática dum detetor de tempo de voo.

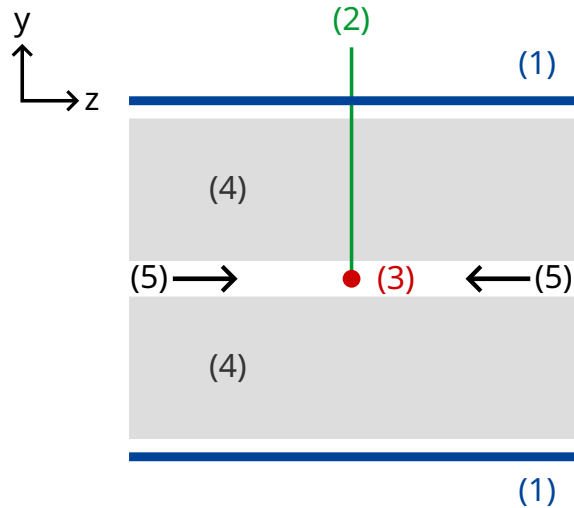
- B.1** Exprima a massa  $m$  da partícula em função do momento linear  $p$ , da distância percorrida  $l$  e do tempo de voo  $t$ , assumindo que as partículas têm carga elétrica elementar  $e$  e que viajam com velocidade próxima de  $c$  numa trajetória retilínea no detetor ToF, perpendicular aos dois planos de deteção (veja a Figura 2). 0.8pt

- B.2** Calcule a distância mínima  $l$  num detetor ToF que permita distinguir inequivocamente um kaão carregado dum pião carregado, sabendo que os respetivos módulos do momento linear têm ambos o valor  $1,00 \text{ GeV}/c$ . Para uma boa separação das duas partículas é necessário que a diferença entre as duas medidas de tempo de voo seja maior do que o triplo da resolução temporal do detetor. A resolução temporal típica de um detetor de tempo de voo é  $150 \text{ ps}$  ( $1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$ ). 0.7pt

No que se segue, partículas produzidas numa experiência típica em LHC são identificadas por um conjunto de dois detetores, um detetor de trajetórias e um detetor ToF. Na Figura 3 mostra-se a montagem no plano transversal aos feixes de prótons e também no plano longitudinal (contendo os feixes de prótons). Ambos os detetores são tubos à volta da região de interação. Os feixes estão alinhados com os eixos destes tubos. O detetor de trajetórias mede as trajetórias das partículas eletricamente carregadas que atravessam um campo magnético paralelo aos feixes de prótons. O raio  $r$  da trajetória permite determinar o momento transversal  $p_T$  da partícula (componente do momento linear perpendicular à linha dos feixes de prótons). Como o instante de colisão é conhecido, basta um tubo no detetor de tempo de voo para medir o tempo de voo desde o ponto de interação até ao tubo ToF. Este tubo ToF está localizado junto ao detetor de trajetórias (lado de fora deste). Para esta tarefa pode assumir que todas as partículas criadas na colisão viajam perpendicularmente aos feixes de prótons, isto é, que não têm componente do momento linear paralela à linha dos feixes.



plano transversal



corte da vista  
longitudinal no centro do tubo  
contendo a linha dos feixes

- (1) - Tubo ToF
- (2) - traço (trajetória) da partícula
- (3) - ponto de interação (colisão)
- (4) - detetor de trajetórias
- (5) - feixes de prótons
- ⊗ - campo magnético

Figura 3 : Montagem experimental para a identificação de partículas com um detetor de trajetórias e um detetor ToF. Ambos os detetores são tubos rodeando o ponto de interação, localizado no eixo destes. Do lado esquerdo mostra-se a vista perpendicular à linha dos feixes (plano transversal) e do lado direito a vista contendo a linha dos feixes (plano longitudinal). A partícula está a viajar perpendicularmente à linha dos feixes.

**B.3** Exprima a massa da partícula em função do campo magnético  $B$ , do raio  $R$  do tubo ToF, de constantes fundamentais e das quantidades medidas: raio da trajetória  $r$  e tempo de voo  $t$ . 1.7pt

Foram detetadas quatro partículas e é necessário identificá-las. O campo magnético no detetor de trajetórias foi  $B = 0,500$  T. O raio  $R$  do tubo ToF foi  $3,70$  m. As medidas obtidas foram ( $1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$ ):

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 da sua massa.

0.8pt