

## Grand collisionneur de hadrons (Large Hadron Collider ou LHC) (10 points)

Avant de commencer ce problème, veuillez lire les instructions générales situées dans l'enveloppe séparée.

Il s'agit ici d'étudier la physique de l'accélérateur de particules LHC (grand collisionneur de hadrons) du CERN. Le CERN est le plus grand laboratoire de physique des particules du monde. Son but principal est d'approfondir notre connaissance des lois fondamentales de la nature.

Deux faisceaux de particules sont accélérés à de hautes énergies, guidés autour de l'anneau de l'accélérateur par un fort champ magnétique et amenés ensuite à entrer en collision.

Les protons accélérés ne sont pas répartis uniformément le long de l'accélérateur mais sont groupés par paquets. Les particules générées par les collisions sont observées au moyen de grands détecteurs. Quelques caractéristiques du LHC sont données dans le tableau 1.

<b>L'anneau du LHC</b>	
Circonférence de l'anneau	26659 m
Nombre de paquets par faisceau de proton	2808
Nombre de protons par paquet	$1,15 \times 10^{11}$
<b>Faisceaux de protons</b>	
Énergie des protons	7,00 TeV
Énergie du centre de masse	14,0 TeV

Table 1 : Valeurs numériques typiques des paramètres importants du LHC

Les physiciens des particules utilisent des unités commodes pour l'énergie, la quantité de mouvement et la masse :

L'énergie est mesurée en électron-volts [eV]. Par définition, 1 eV est la quantité d'énergie gagnée par une particule de charge élémentaire,  $e$ , se déplaçant à travers une différence de potentiel de 1 volt ( $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2}$ ).

La quantité de mouvement est mesurée en  $eV/c$  et la masse en  $eV/c^2$ , où  $c$  est la célérité de la lumière dans le vide. Comme 1 eV est une très petite quantité d'énergie, les physiciens des particules utilisent souvent le MeV ( $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ ), le GeV ( $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$ ) ou le TeV ( $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$ ).

La partie A traite de l'accélération de protons ou d'électrons. La partie B s'occupe de l'identification de particules produites par les collisions au CERN.

### Partie A. L'accélérateur du LHC (6 points)

#### Accélération :

On suppose que les protons ont été accélérés par une tension  $V$  de sorte que leur vitesse est très proche de la célérité de la lumière et on néglige toute perte d'énergie par rayonnement ou collision avec d'autres particules.

- A.1** Trouvez l'expression exacte de la vitesse finale  $v$  des protons en fonction de la tension d'accélération  $V$  et de constantes physiques. 0.7pt

Un projet d'expérience future au CERN prévoit d'utiliser des protons du LHC et de les faire entrer en collision avec des électrons d'énergie 60,0 GeV.

- A.2** Pour des particules de haute énergie et de faible masse au repos, l'écart relatif  $\Delta = (c - v)/c$  de la vitesse finale  $v$  par rapport à la célérité de la lumière est très petit. Trouvez une expression approchée de  $\Delta$  au premier ordre, en fonction de  $V$  et des constantes physiques, et calculez  $\Delta$  pour des électrons dont l'énergie est 60,0 GeV. 0.8pt

Nous revenons maintenant aux protons dans le LHC. On suppose que la trajectoire des protons a une forme circulaire.

- A.3** Déterminer l'expression de l'intensité du champ magnétique  $B$  nécessaire pour garder le faisceau de protons sur une trajectoire circulaire. Cette expression devrait contenir seulement l'énergie des protons  $E$ , la circonférence  $L$  du LHC, constantes fondamentales et des nombres. Vous pouvez utiliser des approximations si leur effet est plus petit que la précision donnée par le dernier chiffre significatif. Calculez le champ magnétique  $B$  pour un proton d'énergie  $E = 7,00$  TeV. On négligera les interactions entre protons. 1.0pt

### Puissance rayonnée :

Une particule chargée accélérée rayonne de l'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques. La puissance rayonnée  $P_{\text{rad}}$  d'une particule chargée circulant avec une vitesse angulaire constante ne dépend que de son accélération  $a$ , de sa charge  $q$ , de la célérité de la lumière  $c$  et de la permittivité diélectrique du vide  $\epsilon_0$ .

- A.4** Déterminez par analyse dimensionnelle une expression possible de la puissance rayonnée  $P_{\text{rad}}$ . 1.0pt

La formule exacte de la puissance rayonnée contient un facteur multiplicatif  $1/(6\pi)$ ; de plus, un traitement relativiste complet amène un facteur multiplicatif additionnel  $\gamma^4$ , avec  $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-\frac{1}{2}}$ .

- A.5** Calculez la puissance totale rayonnée  $P_{\text{tot}}$  du LHC pour un proton d'énergie  $E = 7,00$  TeV (utilisez la table 1). Vous pourrez faire des approximations si elles sont convenables. 1.0pt

### Accélération linéaire :

Au CERN, des protons au repos sont accélérés par une différence de potentiel de 500 MV, dans un module d'accélérateur linéaire d'une longueur de  $d = 30,0 \text{ m}$ . On suppose que le champ électrique est homogène. Un module d'accélérateur linéaire est constitué de deux armatures, comme le montre la figure 1.

**A.6** Déterminez la durée  $T$  mise par les protons pour traverser l'accélérateur. 1.5pt

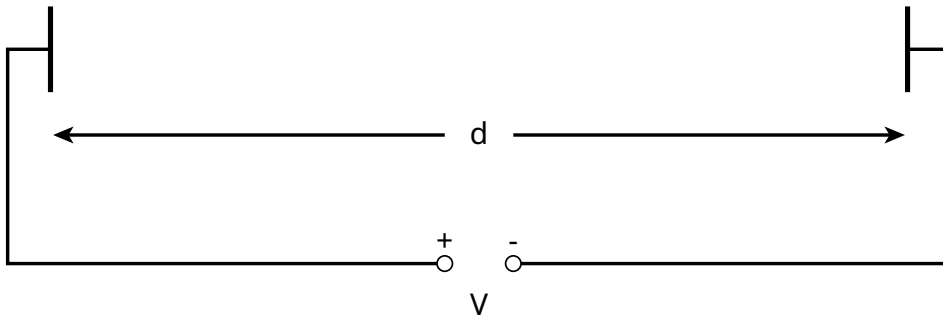


Figure 1 : Schéma d'un module d'accélérateur.

## Partie B. Identification de particules (4 points)

### Temps de vol (ToF) :

L'identification des particules à haute énergie générées par la collision est nécessaire pour interpréter le processus d'interaction. Une méthode simple consiste à mesurer la durée  $t$  mise par une particule de quantité de mouvement connue pour traverser une longueur  $l$  dans un détecteur ToF, dit de "temps de vol" (ToF = Time-of-Flight). Des particules typiques identifiées par un tel détecteur sont répertoriées avec leurs masses dans le tableau 2.

Particule	Masse [MeV/c <sup>2</sup> ]
Deuteron	1876
Proton	938
Kaon chargé	494
Pion chargé	140
Électron	0,511

Table 2 : Particules et leurs masses.

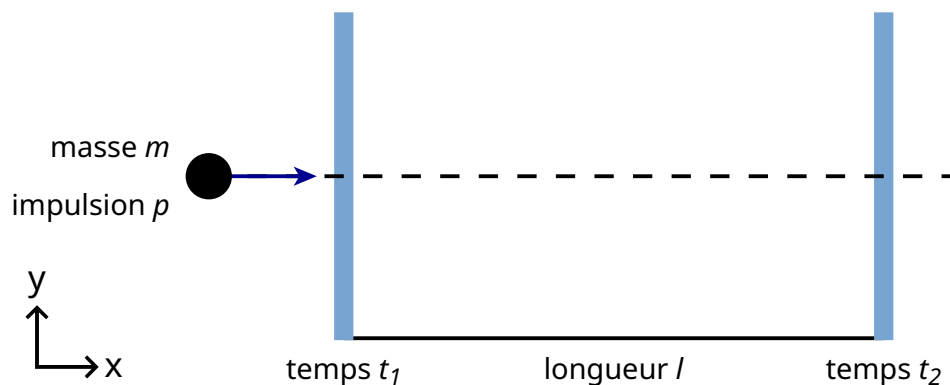
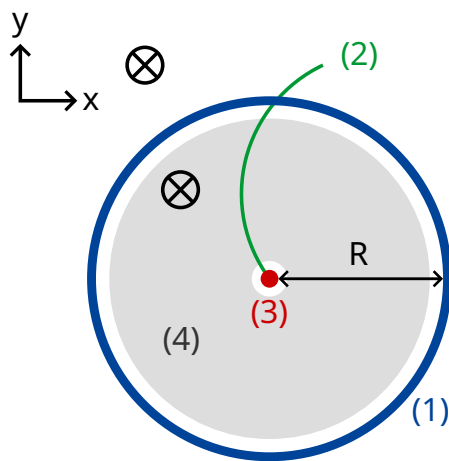


Figure 2 : Vue schématique d'un détecteur de temps de vol.

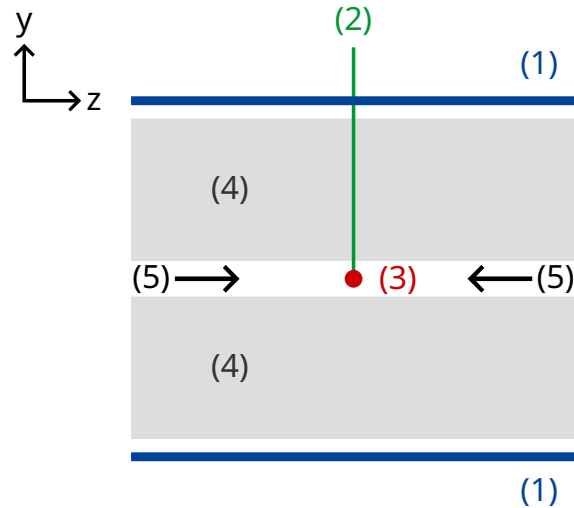
- B.1** Exprimez la masse d'une particule  $m$  en fonction de sa quantité de mouvement (ou impulsion)  $p$ , de la distance de vol  $l$  et du temps de vol  $t$ . On supposera que les particules sont de charge élémentaire  $e$  et se déplacent à une vitesse proche de  $c$  suivant une trajectoire rectiligne perpendiculaire aux deux plans de détection (voir figure 2). 0.8pt

- B.2** Calculez la longueur minimale  $l$  du détecteur de temps de vol qui permet de distinguer à coup sûr un kaon chargé d'un pion chargé, sachant que leurs quantités de mouvement mesurées sont  $1,00 \text{ GeV}/c$ . Pour une bonne séparation, il est nécessaire que la différence de temps de vol soit trois fois plus grande que la résolution temporelle du détecteur. La résolution typique d'un détecteur de temps de vol est de  $150 \text{ ps}$  ( $1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$ ). 0.7pt

Par la suite, des particules produites dans un détecteur LHC typique sont identifiées au moyen d'un détecteur à deux étages, composé d'un détecteur de traces et d'un détecteur de temps de vol (ToF). La figure 3 représente ce montage dans le plan transversal et dans le plan longitudinal par rapport au faisceau de protons. Les deux détecteurs sont des tubes entourant la zone d'interaction, le faisceau passant au milieu des tubes. Le détecteur de traces mesure la trajectoire d'une particule chargée qui traverse un champ magnétique dont la direction est parallèle aux faisceaux de protons. Le rayon  $r$  de la trajectoire permet de déterminer la quantité de mouvement transverse  $p_T$  de la particule. Comme l'instant de la collision est connu, le détecteur de temps de vol ne nécessite qu'un unique tube pour mesurer le temps de vol (durée séparant l'instant de la collision et celui de la détection sur le tube du détecteur ToF). Ce tube du détecteur ToF est situé juste à l'extérieur de la chambre de détection de traces. Pour ce faire, on suppose que toutes les particules créées par la collision se déplacent perpendiculairement aux faisceaux de protons, ce qui veut dire que les particules créées n'ont pas de quantité de mouvement dans la direction des faisceaux de protons.



vue transversale



section de la  
vue longitudinale au centre  
du tube (le long du faisceau)

- (1) - Tube ToF
- (2) - trace
- (3) - point de collision
- (4) - détecteur de traces
- (5) - faisceaux de protons
- ⊗ - champ magnétique

Figure 3 : Montage expérimental pour l'identification de particules avec une chambre de détection de traces et un détecteur ToF. Les deux détecteurs sont des tubes situés autour du point de collision situé au centre. À gauche : vue transversale perpendiculaire à la direction du faisceau. À droite : vue longitudinale parallèle à la direction du faisceau. La particule se déplace perpendiculairement à la direction du faisceau.

**B.3** Exprimez la masse de la particule en fonction de l'intensité du champ magnétique  $B$ , du rayon  $R$  du tube du détecteur ToF, des constantes fondamentales et des grandeurs mesurées : le rayon  $r$  de la trajectoire et le temps de vol  $t$ . 1.7pt

Nous avons détecté quatre particules et voulons les identifier. Le champ magnétique dans le détecteur de traces était  $B = 0,500$  T. Le rayon  $R$  du tube du détecteur ToF était  $3,70$  m. Voici les mesures ( $1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$ ):

Particule	Rayon de la trajectoire $r$ [m]	Temps de vol $t$ [ns]
A	5,10	20
B	2,94	14
C	6,06	18
D	2,31	25

**B.4** Identifiez les quatre particules en calculant leurs masses.

0.8pt