

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

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

Il s'agit d'étudier, dans ce problème, la physique de l'accélérateur de particules LHC (grand collisionneur de hadrons) au CERN. Le CERN est le plus grand laboratoire de physique des particules. 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 entrent ensuite en collision. Les protons accélérés sont groupés par paquets. Les particules générées par ces collisions sont observées au moyen de grands détecteurs. Quelques caractéristiques du LHC sont données dans la table 1.

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

Table 1 : Valeurs numériques typiques des caractéristiques importantes du LHC

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

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

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

- |            |  |       |
|------------|--|-------|
| <b>A.1</b> | Trouvez l'expression exacte de la vitesse finale $v$ des protons en fonction de la tension d'accélération $V$ et des constantes fondamentales. | 0.7pt |
|------------|--|-------|

Un projet pour une 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. A partir d'une expression simplifiée au premier ordre, trouvez une approximation de  $\Delta$  et calculez  $\Delta$ , pour des électrons dont l'énergie est 60,0 GeV, à partir de la tension d'accélération  $V$  et de constantes physiques. 0.8pt

Nous revenons maintenant aux protons dans le LHC. Supposez que le faisceau de protons ait une forme tubulaire de section circulaire.

- A.3** Trouvez l'expression du champ magnétique  $B$  nécessaire pour maintenir le faisceau de protons sur une trajectoire circulaire. L'expression ne doit contenir que l'énergie des protons  $E$ , la circonférence  $L$ , des constantes fondamentales et des nombres. Vous pouvez utiliser des approximations tant que l'imprécision qu'elles génèrent est plus petite que celle qui correspond au dernier chiffre significatif. Calculez le champ magnétique  $B$  nécessaire pour un proton d'énergie  $E = 7.00$  TeV en négligeant les interactions entre les protons. 1.0pt

### Puissance rayonnée :

Une particule chargée accélérée rayonne de l'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques. La puissance rayonnée  $P_{\text{rad}}$  par une particule chargée circulant sur un cercle 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** Utilisez l'analyse dimensionnelle afin d'obtenir une expression pour  $P_{\text{rad}}$ . 1.0pt

La formule réelle donnant la puissance rayonnée contient un facteur  $1/(6\pi)$ ; de plus, un traitement relativiste complet amène un facteur multiplicatif de plus  $\gamma^4$ , 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 (Pensez à la table 1). Vous pouvez utiliser des approximations appropriées. 1.0pt

### Accélérateur linéaire

Au CERN, les protons sont accélérés à partir du repos par une tension de 500 MV, dans un accélérateur linéaire d'une longueur de  $d = 30,0$  m. On suppose que le champ électrique est uniforme. Un accélérateur linéaire comporte deux plaques disposées comme indiqué par la figure 1.

- A.6** Déterminez le temps  $T$  mis par les protons pour traverser ce champ. 1.5pt

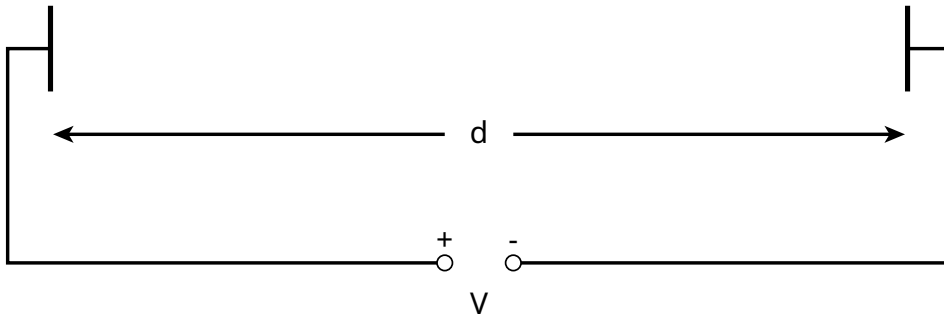


Figure 1 : Schéma d'un d'accélérateur.

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

### Temps de vol (ToF) :

L'identification des particules à haute énergie générées par la collision est importante pour interpréter le processus d'interaction. Une méthode simple consiste à mesurer le temps  $t$  mis par une particule de quantité de mouvement connue pour traverser une longueur  $l$  dans un détecteur, ce temps étant appelé "temps de vol" (ToF = Time-of-Flight). Des particules typiques identifiées par un tel détecteur sont répertoriées avec leur masse dans la table 2.

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

Table 2 : Particules et leur masse.

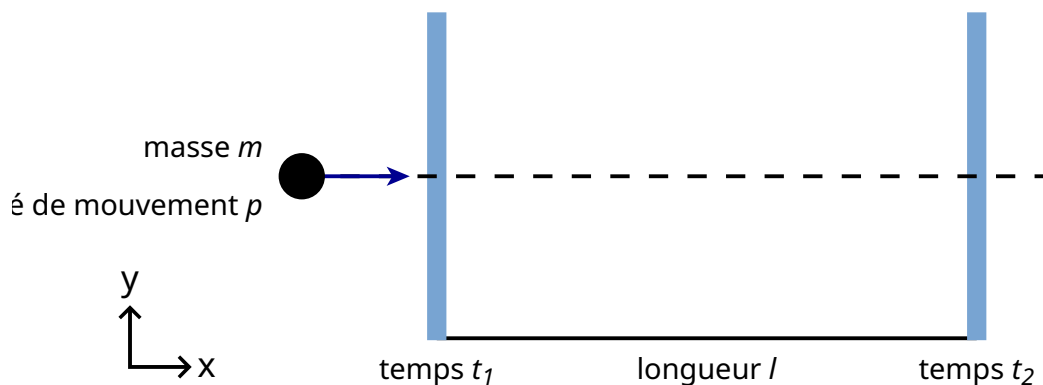
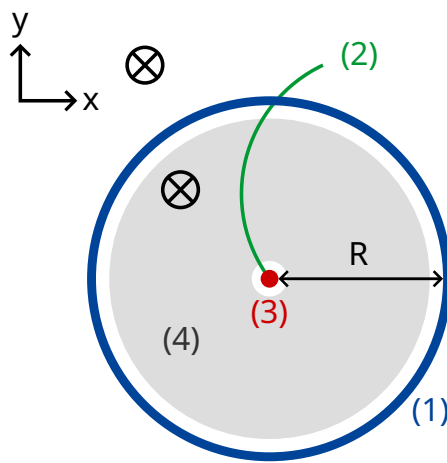


Figure 2 : Schéma d'un détecteur de temps de vol.

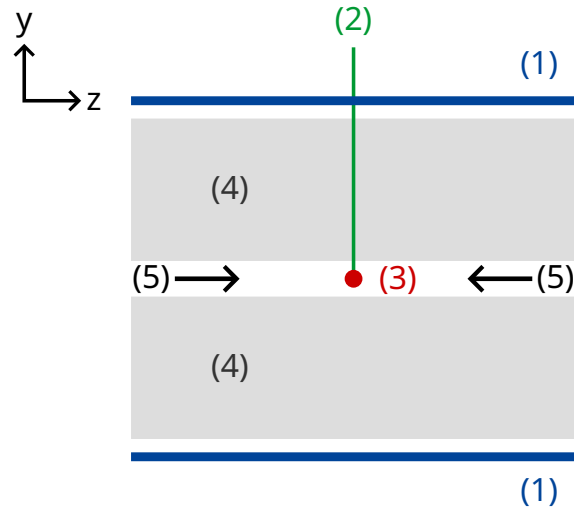
- B.1** Exprimez la mesure de la masse  $m$  d'une particule en termes de sa quantité de mouvement  $p$ , de la distance de vol  $l$  et du temps de vol  $t$ . On supposera que cette particule a une charge élémentaire  $e$  et se déplace à une vitesse proche de celle de la lumière sur une trajectoire rectiligne normale aux deux plans de détection du détecteur ToF (voir figure 2). 0.8pt

- B.2** Calculez la longueur minimale  $l$  du détecteur ToF 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 dans le temps de vol soit trois fois plus grande que la résolution temporelle du détecteur. La résolution typique d'un détecteur ToF 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 ToF. On peut voir cet arrangement selon un coupe transversale ou longitudinale au faisceau de protons dans la figure 3. Les deux détecteurs sont des tubes entourant la région d'interaction; le faisceau de protons passe le long de l'axe principal des tubes. Le détecteur de traces mesure la trajectoire d'une particule chargée qui traverse un champ magnétique parallèle au faisceau de protons. Le rayon  $r$  de la trajectoire permet de déterminer la quantité de mouvement transverse  $p_T$  de la particule. Comme le temps de collision est connu, le détecteur ToF ne nécessite qu'un seul tube pour mesurer le temps de vol (temps écoulé entre la collision et la détections dans le ToF tube). Ce tube du ToF est situé juste en dehors de la chambre de détection de traces. Pour ce faire, vous pouvez supposer 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 du faisceau de protons.



vue transversale



vue longitudinale

- (1) - Tube ToF
- (2) - Trace de la particule à identifier
- (3) - Point de collision des faisceaux
- (4) - Tube détecteur de traces
- (5) - Faisceaux de protons
- ⊗ - Champ magnétique

Figure 3 : Montage expérimental pour l'identification de particules à l'aide d'une chambre de détection de traces et un détecteur ToF. Les deux détecteurs sont des tubes entourant le point de collision. A gauche : vue transversale perpendiculaire au faisceau. A droite : vue longitudinale parallèle au faisceau. La particule à identifier se déplace dans un plan normal au faisceau.

**B.3** Exprimez la masse de la particule en terme du champ magnétique  $B$ , du rayon  $R$  du tube du détecteur ToF, des constantes fondamentales et des grandeurs mesurées : le rayon  $r$  de la trace et le temps de vol  $t$ . 1.7pt

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

Particule	$r$ [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 leur masse.

0.8pt