

## 4 Collisionneur

Un accélérateur de particules est un appareil utilisant des champs électrique ou magnétique pour amener des particules chargées à de très grandes vitesses. En recherche, les accélérateurs de particules servent, à partir de collisions entre particules, à observer les constituants de la matière et étudier les interactions qui les régissent. Dans le domaine médical, ils sont utilisés pour les traitements de cancers par radiothérapie.

### Doc. 1 Accélérateur linéaire de Stanford

Long de 3,2 km, l'accélérateur linéaire de Stanford (SLAC) est le plus grand accélérateur linéaire de particules du monde. Fabriqué en 1962 suivant la technique de Wideröe, il compte environ 1 500 employés.

Trois prix Nobel de physique ont été décernés pour des recherches dans le domaine de la physique des particules au sein de cet accélérateur :

- en 1976, pour la découverte du quark *charm* ;
- en 1990, pour la découverte de la structure en quark du proton et du neutron ;
- en 1995, pour la découverte du lepton  $\tau$ .

Depuis quelques années, le SLAC élargit son domaine de recherche et s'ouvre également à la photonique.

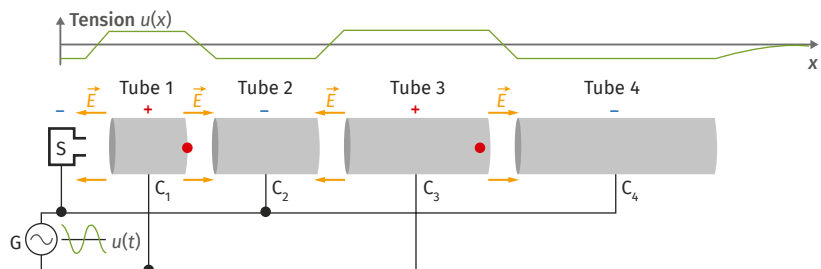


### Doc. 2 Modèle de Wideröe

L'appareil est constitué d'une source de particules S et d'une succession de tubes sous vide, séparés par de faibles interstices, disposés en ligne droite. Deux tubes consécutifs sont de charges opposées. La tension étant variable, leur charge est alternativement positive ou négative au cours du temps. À l'intérieur des tubes, le champ électrique est nul. Par contre, le champ électrique  $\vec{E}$  dans les interstices est variable au cours du temps.

Pour que l'accélération des particules soit optimale, il faut qu'elles traversent les zones entre les tubes au moment où

le champ électrique est maximal et la charge du tube quitté doit être identique à celle de la particule accélérée. Les particules qui ne sont pas injectées au bon moment ou à la mauvaise vitesse initiale se retrouvent rapidement freinées.



### Doc. 3 Champ électrique entre deux tubes voisins

On note  $\vec{E}$  le champ électrique créé par la différence de potentiel  $U$  entre deux tubes voisins. Le champ  $\vec{E}$  dans l'interstice est supposé uniforme et constant, car on suppose le passage de la particule dans l'interstice suffisamment court. Si on note  $d$  la distance entre deux tubes, on a :

$$E = \frac{U}{d}$$

#### Données

- Masse d'un proton :  $m_p = 1,67 \times 10^{-27}$  kg
- Charge élémentaire :  $e = 1,60 \times 10^{-19}$  C
- Intensité de pesanteur :  $g = 9,81$  N·kg<sup>-1</sup>
- Conversion d'unités d'énergie : 1 eV =  $1,60 \times 10^{-19}$  J



## Questions

## 1. Variation de vitesse

Soit un proton qui pénètre dans le premier interstice (entre les tubes 1 et 2) avec une vitesse initiale  $\vec{v}_0$  de valeur  $v_0$  de direction parallèle à l'axe (Ox) des tubes.

- 1.1 Faire un schéma d'un proton entrant dans la zone située entre les deux tubes et représenter  $\vec{E}$ ,  $\vec{v}_0$  ainsi que le vecteur force électrique  $\vec{F}$ . Justifier le sens et la direction de  $\vec{F}$ .
- 1.2 Sachant que la valeur du champ électrique appliqué entre deux tubes est de l'ordre de  $1,0 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$ , justifier que le mouvement du proton peut être étudié en ne tenant compte que de la force électrique.
- 1.3 Le référentiel de l'accélérateur de particules peut être considéré comme galiléen. Écrire la deuxième loi de Newton appliquée au proton et justifier que le proton est bien accéléré dans le bon sens et suivant la bonne direction.
- 1.4 Préciser comment évolue la vitesse du proton à l'intérieur d'un tube.

## 2. Deuxième interstice

- 2.1 Lorsque le proton arrive dans le deuxième interstice (entre les tubes 2 et 3), les charges des tubes sont inversées : les tubes impairs sont chargés négativement et les tubes pairs sont chargés positivement. Justifier cette nécessité.

- 2.2 Donner l'expression du travail de la force électrique sur le proton se déplaçant entre deux tubes voisins, séparés d'une distance  $d$ , d'abord en fonction de  $E$ , puis de  $U$ .
- 2.3 En déduire que la variation d'énergie cinétique du proton lors de la traversée d'un interstice est :

$$\Delta E_c = e \cdot U$$

## 3. Évolution des grandeurs

On considère que le proton étudié a pénétré à l'intérieur du premier tube de manière à ce qu'il soit accéléré de façon optimale. Soit  $v_0$  sa vitesse à l'entrée du premier tube et  $E_{c0}$  son énergie cinétique.

- 3.1 Donner l'expression de l'énergie cinétique du proton dans le deuxième tube.
- 3.2 Montrer alors que l'énergie cinétique du proton dans le  $n$ -ième tube est :
- $$E_{cn} = E_{c0} + e \cdot U \cdot (n - 1)$$
- 3.3 En déduire l'expression de la valeur de la vitesse  $v_n$  de la particule dans le tube en fonction de  $E_{cn}$ .
- 3.4 Justifier l'évolution de la longueur des tubes.

## Doc. 4 Période du signal électrique

Soit  $T$  la période du signal électrique. La tension aux bornes du générateur doit prendre sa valeur maximale ( $+U$ ) ou minimale ( $-U$ ) lorsque la particule est dans un interstice. De plus, à chaque nouvel interstice, le sens de la tension doit s'inverser pour que la particule soit toujours accélérée. Ainsi, la particule doit traverser un tube en une durée  $\frac{T}{2}$ .

## Doc. 5 Fonctionnement de l'accélérateur

Dans un accélérateur de particules, les longueurs des tubes ont été calculées pour l'utilisation suivante :

- valeur maximale de la tension aux bornes de deux tubes :  $U = 100 \text{ kV}$  ;
- fréquence du signal électrique du générateur :  $f = 25 \text{ MHz}$  ;
- vitesse initiale des protons à l'entrée dans le premier tube :  $v_0 = 5,36 \times 10^6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

## Questions

- 3.5 Déterminer l'expression de la longueur du  $n$ -ième tube  $L_n$  en fonction de  $T$  et de  $v_n$ .
- 3.6 En déduire que l'expression de la longueur du tube est :

$$L_n = \frac{T}{2} \cdot \sqrt{\frac{2 E_{cn}}{m}}$$

- 3.7 Calculer :
- l'énergie cinétique  $E_{c0}$  du proton dans le premier tube ;
  - l'énergie cinétique  $E_{c3}$  du proton dans le troisième tube ;
  - la valeur de la vitesse  $v_3$  du proton dans le troisième tube ;
  - la longueur  $L_3$  du troisième tube.