Protons énergétiques

Bac S 2013 Inde (Pondichéry) (ancien programme) · Exercice 1 **5,5 points** **Durée conseillée 50 min**

1.1 L'interaction forte est-elle attractive ou répulsive ? Est-elle plus ou moins intense que l'interaction électrique ? Justifier à l'aide du document 1.

D'après le document 1, l'interaction électrique entre protons est répulsive et l'emporte largement sur l'interaction gravitationnelle : à elles deux, elles feraient éclater le noyau.

Or le noyau reste soudé, et c'est l'interaction forte qui assure sa cohésion : elle rapproche les nucléons et domine la répulsion électrique.

L'interaction forte est **attractive** et **plus intense** que l'interaction électrique.

PIÈGE
Répondre sans citer le document. Deux justifications sont attendues : la cohésion du noyau (attractive) et le fait qu'elle l'emporte sur la répulsion entre protons (plus intense).

1.2 Déterminer la charge électrique d'un quark up, sous la forme d'une fraction de la charge e du proton.

Données utiles proton : deux quarks up et un quark down ; charge du quark down : $-\frac{e}{3}$

La charge du proton, égale à $+e$, est la somme des charges de ses trois quarks. En notant q_u la charge d'un quark up :

$$2\,q_u - \frac{e}{3} = e \quad \text{donc} \quad 2\,q_u = \frac{4e}{3}$$

$$q_u = +\frac{2}{3}\,e$$

MÉTHODE
Vérifier le résultat par la somme : $\frac{2e}{3} + \frac{2e}{3} - \frac{e}{3} = e$. La charge se conserve, celle d'un édifice est la somme des charges de ses constituants.

2.1 Calculer, en joule puis en mégaélectron-volt, l'énergie cinétique d'un proton dont la vitesse vaut 10 % de la célérité c de la lumière dans le vide.

Données utiles $m_p = 1{,}673 \times 10^{-27}$ kg ; $c = 3{,}00 \times 10^{8}\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; $1\ \text{MeV} = 1{,}602 \times 10^{-13}$ J

À $v = 0{,}10\,c$, le proton est à la limite du domaine classique (document 4) : $E_c = \frac{1}{2} m_p\, v^2$.

$$E_c = \frac{1}{2} \times 1{,}673 \times 10^{-27} \times \left(0{,}10 \times 3{,}00 \times 10^{8}\right)^2 = 7{,}5 \times 10^{-13}\ \text{J}$$

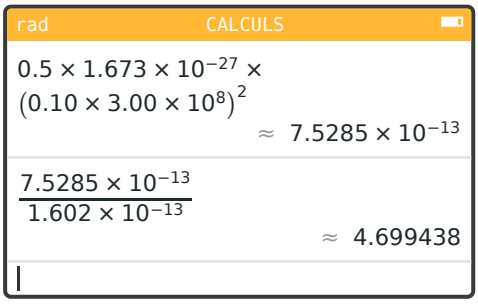
Conversion : $E_c = \dfrac{7{,}5285 \times 10^{-13}}{1{,}602 \times 10^{-13}} = 4{,}7\ \text{MeV}$

$$E_c = 7{,}5 \times 10^{-13}\ \text{J} = 4{,}7\ \text{MeV}$$

PIÈGE
Oublier le carré sur la vitesse, ou multiplier par $1{,}602 \times 10^{-13}$ au lieu de diviser : un proton ne peut pas avoir une énergie de 10^{-25} MeV.

COMPRENDRE
Deux chiffres significatifs : la donnée la moins précise est « 10 % ». Pour convertir, on garde la valeur non arrondie de la calculatrice.

À LA CALCULATRICE



2.2 Justifier par un argument quantitatif la phrase du document 4 : « les protons les plus énergétiques des rayons cosmiques sont relativistes ».

Données utiles $E_c = 4{,}7$ MeV à $v = 0{,}10\,c$ (2.1) ; protons cosmiques : de 100 MeV à 10 GeV

Un proton est classique tant que $v < 0{,}10\,c$, c'est-à-dire tant que son énergie cinétique reste inférieure à $4{,}7$ MeV (2.1).

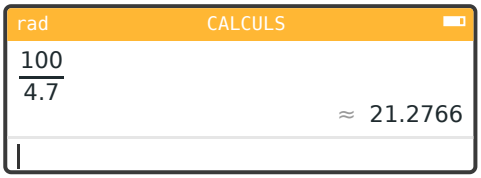
Les protons cosmiques les plus énergétiques ont une énergie cinétique d'au moins 100 MeV, soit plus de 20 fois cette limite ($\frac{100}{4{,}7} \approx 21$). L'énergie cinétique augmentant avec la vitesse, leur vitesse dépasse $0{,}10\,c$.

$E_c \geqslant 100\ \text{MeV} \gg 4{,}7\ \text{MeV}$: ces protons sont relativistes.

PIÈGE

Calculer leur vitesse avec $E_c = \frac{1}{2}mv^2$: la formule n'est plus valable pour eux. On compare donc des énergies, pas des vitesses.

À LA CALCULATRICE



2.3.1 Calculer la valeur de la quantité de mouvement p d'un proton dont la vitesse vaut 10 % de c.

Données utiles $m_p = 1{,}673 \times 10^{-27}$ kg ; $c = 3{,}00 \times 10^{8}\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

Le proton est encore classique à cette vitesse : $p = m_p\,v$.

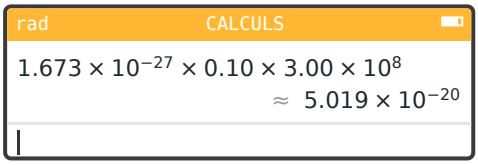
$$p = 1{,}673 \times 10^{-27} \times 0{,}10 \times 3{,}00 \times 10^{8}$$

$p = 5{,}0 \times 10^{-20}\ \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

COMPRENDRE

La quantité de mouvement $p = mv$ était au programme du Bac S ; elle ne figure plus dans celui de la spécialité actuelle.

À LA CALCULATRICE



2.3.2 En déduire la valeur de la longueur d'onde λ associée.

Données utiles $h = 6{,}62 \times 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s}$; $p = 5{,}019 \times 10^{-20}\ \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (2.3.1)

Relation de de Broglie : $\lambda = \frac{h}{p}$.

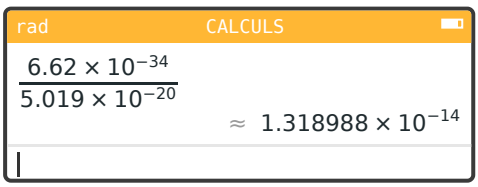
$$\lambda = \frac{6{,}62 \times 10^{-34}}{5{,}019 \times 10^{-20}}$$

$\lambda = 1{,}3 \times 10^{-14}\ \text{m}$

COMPRENDRE

Cette longueur d'onde est de l'ordre de la taille d'un noyau. La relation de de Broglie et les ondes de matière ne sont plus au programme de la spécialité actuelle.

À LA CALCULATRICE



3.1 Expliquer pourquoi les muons sont des particules relativistes.

Données utiles $v = 0{,}9997\,c$; limite du domaine classique : $0{,}10\,c$ (document 4)

D'après le document 4, une particule est relativiste dès que sa vitesse atteint ou dépasse 10 % de c.

$v = 0{,}9997\,c > 0{,}10\,c$: les muons sont relativistes.

3.2 Expliquer par un raisonnement quantitatif pourquoi des muons issus des rayons cosmiques peuvent être observés au niveau du sol terrestre.

Données utiles $v = 0{,}9997\,c$; $\Delta t_0 = 2{,}2\ \mu s$; durée de la traversée pour un observateur terrestre : $67\ \mu s$

Dans le référentiel terrestre, où le muon est en mouvement, sa durée de vie est dilatée : $\Delta t = \gamma\,\Delta t_0$.

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1-0{,}9997^2}} = 40{,}83$$

$$\Delta t = 40{,}83 \times 2{,}2 = 90\ \mu s$$

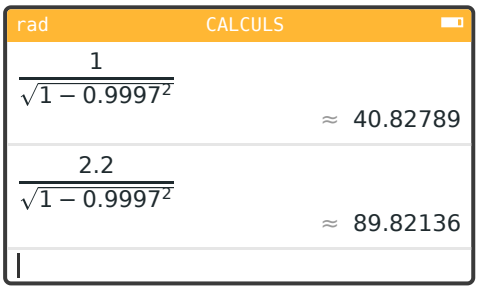
Les deux durées sont mesurées par le même observateur terrestre, on peut les comparer : la durée de vie du muon ($90\ \mu s$) dépasse la durée de la traversée de l'atmosphère ($67\ \mu s$).

$\Delta t = 90\ \mu s > 67\ \mu s$: des muons atteignent le sol avant de se désintégrer.

PIÈGE
Comparer $2{,}2\ \mu s$ à $67\ \mu s$: ces durées ne sont pas mesurées dans le même référentiel. La durée propre est celle mesurée dans le référentiel où le muon est immobile.

COMPRENDRE
Comme $v/c = 0{,}9997$, la célérité c se simplifie dans γ. La relativité restreinte (dilatation des durées) ne figure plus au programme de la spécialité actuelle.

À LA CALCULATRICE



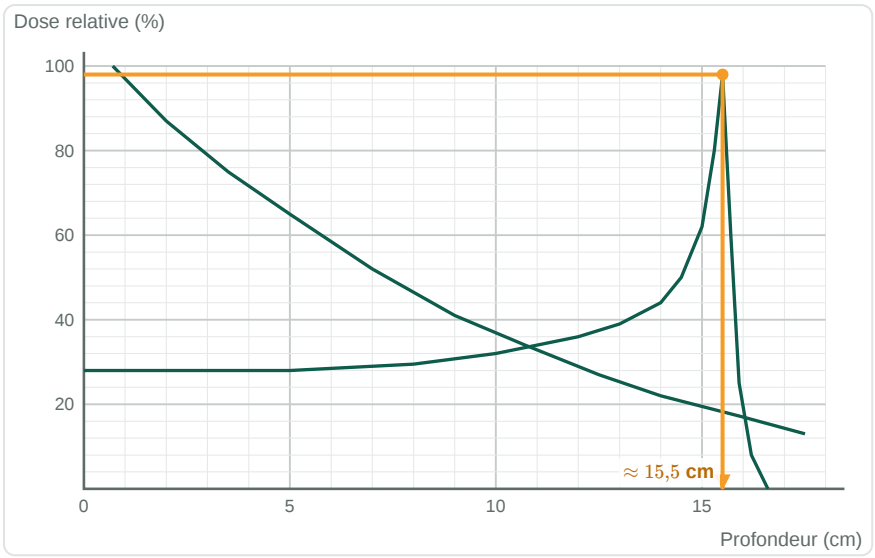
4.1 Pour l'exemple de la figure 2, déterminer à quelle profondeur doit se trouver la tumeur traitée pour que la protonthérapie soit la plus efficace. Justifier.

Le traitement est le plus efficace si la tumeur reçoit le maximum d'énergie, donc si elle se trouve là où la dose relative des protons est maximale (100 %) : au pic de Bragg.

Lecture de l'abscisse du pic sur la figure 2 :

La tumeur doit se trouver à une profondeur d'environ $15{,}5$ cm.

MÉTHODE
Une lecture graphique se justifie : dire quelle grandeur on repère (ici le maximum de dose), puis lire l'abscisse avec l'échelle. Toute valeur entre 15 et 16 cm est acceptée.



4.1 · Figure 2 du sujet (allure) : protons de 150 MeV (courbe avec pic) et photons (courbe décroissante), lecture du pic de Bragg

4.2 Lequel des deux traitements respecte le mieux « l'art de la radiothérapie » ? Deux arguments sont attendus.

L'art de la radiothérapie : une dose suffisante pour détruire toutes les cellules cancéreuses, en abîmant le moins possible les cellules saines.

- Les protons déposent leur dose maximale dans une zone étroite, celle de la tumeur (pic de Bragg), alors que les photons n'y déposent plus qu'environ 20 % de la dose maximale.
- Les tissus sains sont mieux épargnés : avant la tumeur, les protons déposent environ 30 % de la dose maximale et, après le pic, la dose tombe à zéro. Les photons, eux, cèdent le plus d'énergie dès l'entrée (près de 100 %) et irradient encore au-delà de la tumeur.

La **protonthérapie** respecte le mieux l'art de la radiothérapie.

PIÈGE
Donner deux fois le même argument. Il en faut un sur la tumeur (dose maximale au bon endroit) et un sur les cellules saines (peu de dose avant, aucune après), appuyés sur des valeurs lues sur la figure 2.