

PREMIÈRE PARTIE : CONTRÔLE DES CONNAISSANCES

Données :

Constante de Planck :

$$h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}^{-1}$$

Célérité de la lumière dans le vide :

$$c = 3,00 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

Charge élémentaire :

$$e = 1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$$

Masse d'un proton :

$$m_p = 1,6725 \times 10^{-27} \text{ kg} = 1,0073 \text{ u}$$

Masse d'un neutron :

$$m_N = 1,6748 \times 10^{-27} \text{ kg} = 1,0087 \text{ u}$$

Masse d'un électron :

$$m_e = 9,1094 \times 10^{-31} \text{ kg} = 5,486 \times 10^{-4} \text{ u}$$

Unité de masse atomique

$$u = 931,5 \text{ MeV.c}^{-2} = 1,6661 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

Q1. QUESTIONNAIRE À CHOIX MULTIPLES (14 points)

Compléter le tableau figurant en feuille annexe 1, À RENDRE AVEC LA COPIE en indiquant pour chaque proposition vrai (V) ou faux (F). Justifier la réponse vraie ou fausse sur la copie quand cela est demandé. Remarque : il peut y avoir plusieurs propositions vraies.

1. Soient le noyau 1 de symbole ${}^{12}_6\text{X}$ et le noyau 2 de symbole ${}^{11}_6\text{Y}$

Ces noyaux ont comme énergies de liaison respective $E_{L1} = 91,6 \text{ MeV}$ et $E_{L2} = 73,0 \text{ MeV}$.

- Ces deux noyaux sont des noyaux isobares.
- L'énergie de liaison du noyau 1 vaut $1,47 \times 10^{-11} \text{ J}$
- Ces deux noyaux sont isotopes. **Justifier la réponse.**
- Le noyau le plus stable est le noyau 2. **Justifier la réponse.**

2. On considère le spectre d'émission de l'atome d'hydrogène. On ne s'intéresse qu'aux radiations de la série de Balmer qui correspondent aux transitions électroniques des niveaux $n = 3, 4, 5, 6$ vers le niveau $n = 2$ (Le niveau $n = 1$ correspondant à l'état fondamental).

- Dans l'atome d'hydrogène, l'énergie exprimée en électron volt, d'un niveau n est donnée par la relation : $E_n = -\frac{13,6}{n^2}$
- Toutes les radiations correspondant aux transitions considérées se situent dans le domaine du visible.
- L'énergie de la radiation la plus énergétique de celles étudiées est égale à $3,02 \text{ eV}$. **Justifier la réponse.**
- La radiation la plus énergétique de la série se nomme "raie $L\alpha$ ".

3. Soit un tube à rayons X alimenté par une tension accélératrice de 50 kV .

- Dans le tube, les rayons X sont émis au niveau de la cathode.
- La plus petite longueur d'onde des radiations émises est égale à $2,5 \times 10^{-12} \text{ m}$. **Justifier la réponse.**
- La partie continue du spectre du tube correspond au rayonnement de freinage.
- Le rayonnement de freinage résulte d'une interaction photons / noyaux des atomes de la cible.

4. On considère une onde ultrasonore de fréquence 2 MHz .

- Dans l'air, cette onde ultrasonore va se déplacer plus vite qu'une onde de même nature appartenant au domaine de l'audible.
- La célérité de cette onde est plus grande dans l'air que dans l'eau.
- La longueur d'onde du signal considéré se propageant dans l'air reste la même dans l'eau.
- On utilisera cette fréquence de 2 MHz plutôt qu'une fréquence de 10 MHz pour explorer par échographie un organe profond.

Q2. EFFET COMPTON ET AUTRES INTERACTIONS (16 points)

1. Décrire brièvement l'interaction par effet Compton. Illustrer vos propos par un schéma et donner le bilan énergétique.

2. Au cours de cette interaction, on montre que la différence entre λ' , longueur d'onde du photon diffusé, et λ , longueur d'onde du photon incident vaut :

$$\Delta \lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta)$$

où θ correspond à la valeur de l'angle entre la direction du photon incident et celle du photon diffusé, et m_e la masse de l'électron.

Deux "cas extrêmes" peuvent se présenter : cas d'un choc frontal et cas d'un choc tangentiel.

2.1. Dans lequel de ces deux cas l'énergie reçue par le milieu est-elle maximale ?

2.2. Quelle est la valeur de θ dans le cas d'un choc frontal ?

3. Le photon incident a une énergie $E_i = 500$ keV. On suppose qu'il interagit par effet Compton.

3.1. Calculer la longueur d'onde correspondant à ce photon incident.

3.2. A partir des résultats précédents, calculer la longueur d'onde λ' associée au photon diffusé dans le cas du choc frontal correspondant à une valeur de $\Delta\lambda$ égale à $4,85 \times 10^{-12}$ m.

3.3. Vérifier que E_d , l'énergie du photon diffusé, vaut 170 keV.

4. On s'intéresse maintenant aux autres types d'interaction photon-matière.

La figure I de l'**annexe I A RENDRE A VEC LA COPIE** représente les zones de prédominance des différents effets en fonction de l'énergie des photons incidents et du numéro atomique du milieu traversé (absorbeur).

4.1. Compléter la figure 1 de l'**annexe 1 A RENDRE AVEC LA COPIE** avec les noms des différents effets.

4.2. Un photon d'énergie 100 keV interagit avec de l'eau (on considérera que le numéro atomique associé à l'eau, Z , vaut environ 8). Dans ces conditions, quel type d'interaction prédomine ?

4.3. Un photon d'énergie 100 keV interagit avec du plomb de numéro atomique $Z = 82$.

Dans ces conditions, quel type d'interaction prédomine ?

4.4. Quelle énergie minimale doit avoir un photon pour provoquer une matérialisation ? Que représente cette énergie ? Justifier votre réponse à l'aide d'un calcul.

5. Le coefficient d'atténuation linéique global pour des photons de 100 keV traversant l'eau vaut $\mu = 0,17$ cm⁻¹.

5.1. Quel est le pourcentage du nombre de photons transmis après la traversée de 2,0 cm d'eau ?

5.2. Calculer la valeur de la couche de demi-atténuation (C.D.A.) de ce milieu dans ces conditions.

DEUXIÈME PARTIE: PROBLÈME (30 points)

Une application des cyclotrons : production de nouveaux radionucléides

Données spécifiques au problème :

Masse d'un noyau de cuivre ${}^{64}_{29}\text{Cu}$:	$m_{\text{Cu}} = 63,92977 \text{ u}$
Masse d'un noyau de nickel ${}^{64}_{28}\text{Ni}$:	$m_{\text{Ni}} = 63,92797 \text{ u}$
Masse d'un noyau de zinc ${}^{64}\text{Zn}$:	$m_{\text{Zn}} = 63,91265 \text{ u}$
On considérera que $m(\text{H}^-) = m(\text{H}^+) = m_p$	

Les radionucléides sont souvent obtenus en bombardant des cibles par des particules chargées. Le cuivre 64 est obtenu en bombardant une cible de nickel par des protons H^+ .

Un faisceau de particules accélérées grâce à un cyclotron subit un traitement appelé "extraction par stripping". Dans notre cas, des ions hydrure H^- sont accélérés par le cyclotron. Au voisinage de la périphérie du cyclotron, le faisceau d'ions hydrure H^- est dirigé vers une feuille mince, dite "feuille de stripping", réalisée généralement en carbone. Cette feuille de stripping a pour effet d'arracher les électrons périphériques des ions hydrure H^- , changeant ainsi leur charge. La courbure de la trajectoire est alors inversée, et le faisceau est conduit à l'extérieur de la machine par un orifice.

Le schéma du cyclotron étudié est représenté sans souci d'échelle en annexe 2 À **RENDRE A VEC LA COPIE**.

Un champ électrique, variable dans le temps, peut être établi dans l'intervalle étroit qui sépare les "dees" D1 et D2. Le champ électrique est nul à l'intérieur des "dees". On négligera la durée du transit entre les deux "dees".

Le champ électrique variable est obtenu en appliquant une tension sinusoïdale entre les deux "dees", de valeur maximale $U_M = 50,0 \text{ kV}$.

Le cyclotron est réglé de telle façon que lorsque la particule passe entre les deux "dees", la valeur de la tension accélératrice est alors égale à U_M .

Un champ magnétique uniforme \vec{B} de valeur $B = 1,5 \text{ T}$, règne à l'intérieur de chaque "dee", sa direction est perpendiculaire au plan de la figure 2 annexe 2 À **RENDRE A VEC LA COPIE**.

Les parties 1, 2, 3 et 4 sont indépendantes.

La figure 2 relative au problème, en annexe 2, A RENDRE AVEC LA COPIE sera à compléter.

1. Accélération des ions H^- .

1.1. Départ des ions H^- dans la zone où règne le champ électrique E du cyclotron.

1.1.1. Quelle est la valeur de la charge q de l'ion hydrure ?

1.1.2. On injecte un ion hydrure H^- au point O avec une vitesse négligeable. On considère que le poids de l'ion hydrure est négligeable devant les autres forces en présence.

Sur la figure 2 en annexe 2, A **RENDRE A VEC LA COPIE**, est dessinée dans chaque "dee", une partie de la trajectoire d'un ion hydrure H^- .

Sachant qu'au départ l'ion hydrure H^- se dirige vers le "dee" D1, préciser la polarité de chacun des "dees" D1 et D2 à cet instant.

1.1.3. Après avoir justifié les réponses sur votre copie, représenter sur la figure 2 en annexe 2, A **RENDRE AVEC LA COPIE** au point d'injection O :

- le champ électrique \vec{E} régnant entre les deux "dees",
- la force électrique \vec{F}_E s'exerçant alors sur un ion hydrure H^-

1.1.4. Calculer l'énergie cinétique E_0 acquise par un ion hydrure H^- lors d'un passage entre les deux "dees" en joules et en keV.

1.2. Mouvement des ions H^- dans la zone où règne le champ magnétique (zone 1).

1.2.1. Donner l'expression vectorielle de la force magnétique \vec{F}_B (force de Lorentz)

1.2.2. Représenter le vecteur vitesse \vec{v} et la force magnétique \vec{F}_B (force de Lorentz) au point M, sans souci d'échelle sur la figure 2 en annexe 2 **À RENDRE AVEC LA COPIE.**

1.2.3. Représenter le vecteur champ magnétique sur le schéma en justifiant la réponse sur la copie.

1.3. Sortie des ions H^- au voisinage de la périphérie du cyclotron.

On suppose que la vitesse initiale des ions hydrure H^- est négligeable ainsi que la distance entre les deux "dees".

1.3.1. Calculer le nombre de passages n , nécessaires entre les "dees" pour obtenir des ions hydrure H^- d'énergie cinétique finale $E_{cf} = 14,0$ MeV.

1.3.2. En déduire le nombre N de tours effectués par les ions hydrure H^-

1.3.3. Calculer la valeur de la vitesse finale v_f , correspondant à cette énergie. (*On supposera les ions hydrures non relativistes.*)

2. Obtention des protons H^+ .

Lorsque les ions hydrure ont l'énergie cinétique finale E_{cf} , on interpose sur leur trajet, dans la zone 2, où le vecteur champ magnétique est identique à celui de la zone 1, une feuille de carbone. Les ions H^- sont alors "épluchés" et donnent des protons H^+ .

2.1. Combien d'électrons doit-on enlever à l'ion hydrure H^- pour obtenir un proton H^+ ?

2.2. *Les protons obtenus sortent ensuite du dispositif.*

À l'aide de justifications qualitatives, indiquer par son numéro 1, 2 ou 3, la trajectoire qu'ils suivront pour sortir du cyclotron.

3. Obtention des noyaux de cuivre

Les protons obtenus sont envoyés ensuite sur une cible de nickel ^{64}Ni .

Le choc des protons sur la cible de nickel produit des noyaux de cuivre 64.

3.1. Écrire l'équation de cette réaction nucléaire. Préciser la nature de la particule produite en même temps que le noyau $^{64}_{29}Cu$.

3.2. *Il est également possible d'obtenir des noyaux $^{67}_{29}Cu$ à partir cette fois, d'une cible de zinc selon le mécanisme $^A_ZZn(p, 2p)^{67}_{29}Cu$ qui résume le bombardement d'une cible de zinc par des protons avec formation de cuivre 67.*

3.2.1. Écrire l'équation de cette autre réaction nucléaire.

3.2.2. Préciser les valeurs des nombres A et Z du noyau de la cible. Justifier la réponse.

4. Désintégration du cuivre 64.

Le cuivre 64 est émetteur "beta +".

Ce radionucléide est un candidat potentiel en radiodiagnostic.

4.1. Écrire l'équation de désintégration de $^{64}_{29}Cu$ sachant que le noyau formé se trouve dans un état excité.

4.2. Calculer l'énergie libérée lors de la désintégration d'un noyau de $^{64}_{29}Cu$ en MeV. Sous quelles formes cette énergie apparaît-elle ?

4.3. Que va-t-il se passer pour la particule émise lors de cette désintégration pendant la traversée du milieu environnant ? Préciser plus particulièrement le phénomène se produisant en fin de parcours.

4.4. *On considère un échantillon de cuivre 64 présentant une activité $A_0 = 200$ MBq.*

4.4.1. *Sachant que le temps de demi-vie (période radioactive) du cuivre 64 est de 12,7 jours, calculer la valeur de la constante radioactive λ du cuivre 64 dans le système international d'unités.*

4.4.2. *Quel est le nombre N_0 de noyaux de cuivre 64 présents dans l'échantillon considéré ?*

4.4.3. *Calculer la masse de l'échantillon en nanogrammes. On assimilera la masse de l'atome à la masse du noyau.*

4.4.4. *Calculer la durée au bout de laquelle l'échantillon aura perdu 90% de son activité initiale.*

ANNEXE 1 A RENDRE AVEC LA COPIE

Q1 : questionnaire à choix multiple.

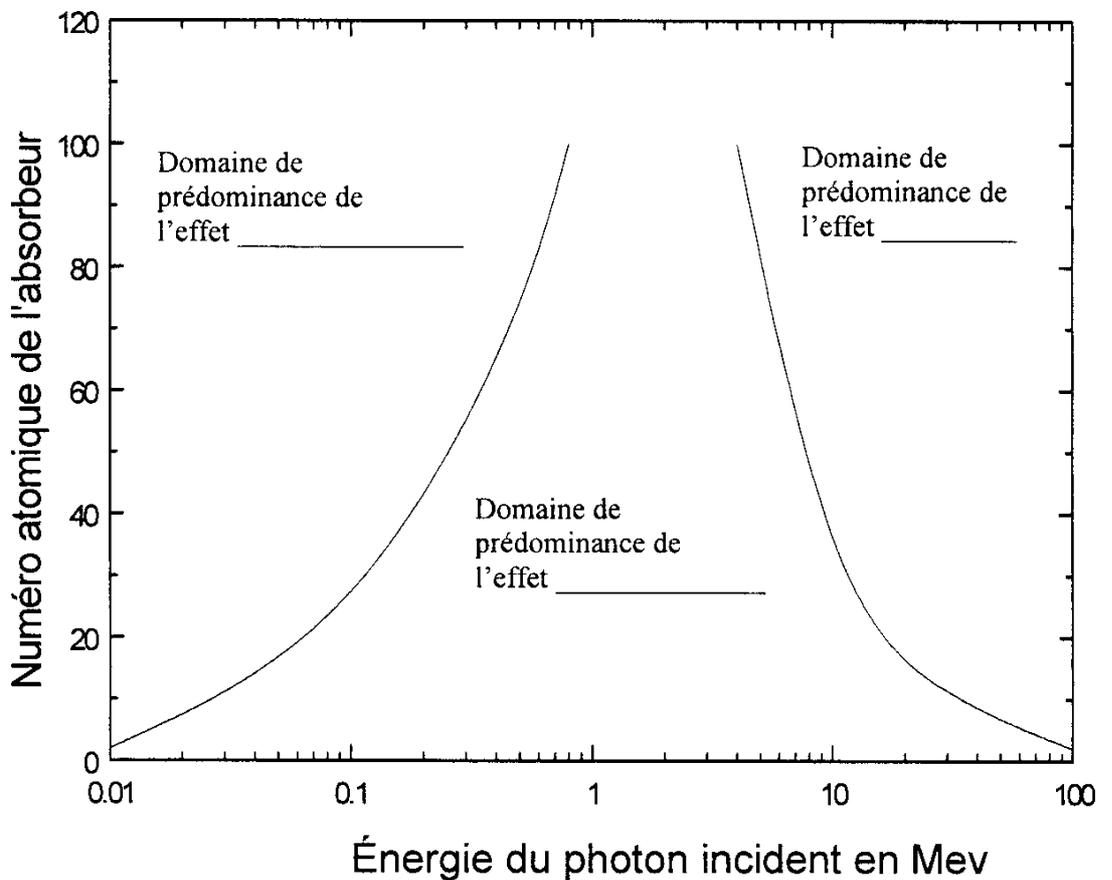
Les cellules grisées correspondent aux réponses à justifier sur la copie.

Tableau à compléter

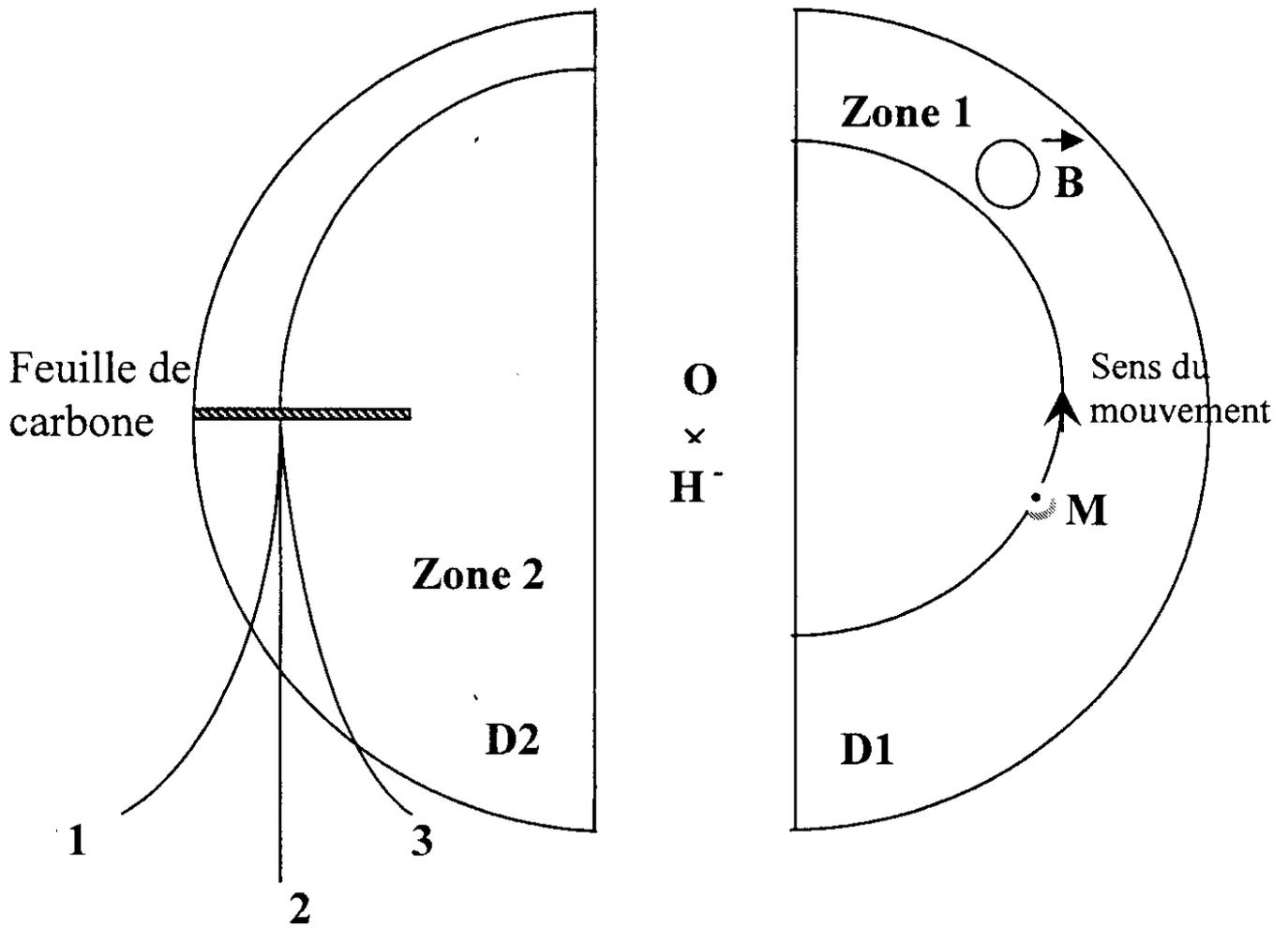
Propositions	a	b	c	d
Questions				
1				
2				
3				
4				

Q2 : Effet Compton et autres interactions

Figure 1



ANNEXE 2 A RENDRE AVEC LA COPIE



Le schéma est représenté sans souci d'échelle