L'américium 241 et quelques applications industrielles

Bac S 2010 Nouvelle-Calédonie rattrapage (ancien programme) · Exercice 1 **5,5 points** **Durée conseillée 1 h 05**

1.1 Énoncer les règles de conservation qui permettent d'écrire l'équation d'une réaction nucléaire.

Lors d'une réaction nucléaire, il y a conservation du nombre de nucléons A et du nombre de charge Z (charge électrique).

PIÈGE
Les éléments chimiques, eux, ne se conservent pas : c'est ce qui distingue une réaction nucléaire d'une transformation chimique.

1.2 Écrire l'équation de la désintégration β qui donne l'américium 241 à partir du plutonium 241.

Données utiles ${}_{94}\mathrm{Pu}$; ${}_{95}\mathrm{Am}$

Conservation de A : $241 = 241 + A$, donc $A = 0$. Conservation de Z : $94 = 95 + Z$, donc $Z = -1$.

La particule émise est un électron : il s'agit d'une désintégration β^-.

${}^{241}_{94}\mathrm{Pu} \longrightarrow {}^{241}_{95}\mathrm{Am} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e}$

COMPRENDRE
Le numéro atomique augmente d'une unité : dans le noyau, un neutron s'est transformé en proton. Un antineutrino accompagne l'électron ; il n'est pas attendu ici.

1.3 L'américium 241 et le plutonium 241 sont-ils des isotopes ? Justifier.

Deux noyaux isotopes ont le même nombre de protons Z et des nombres de nucléons A différents.

Non : $Z = 95$ pour l'américium et $Z = 94$ pour le plutonium, ils ne sont pas isotopes.

PIÈGE
Avoir le même nombre de masse ne suffit pas. C'est le numéro atomique Z qui doit être commun.

2.1 Écrire l'équation de la désintégration de l'américium 241 en neptunium 237 et nommer ce type de désintégration.

Données utiles ${}_{95}\mathrm{Am}$; ${}_{93}\mathrm{Np}$

Conservation de A : $241 = 237 + A$, donc $A = 4$. Conservation de Z : $95 = 93 + Z$, donc $Z = 2$.

La particule émise est un noyau d'hélium 4, appelé particule α.

${}^{241}_{95}\mathrm{Am} \longrightarrow {}^{237}_{93}\mathrm{Np} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$: c'est une désintégration α.

MÉTHODE
Poser la particule inconnue ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$, appliquer les deux lois de conservation, puis identifier : ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$ pour α, ${}^{0}_{-1}\mathrm{e}$ pour β^-, ${}^{0}_{1}\mathrm{e}$ pour β^+.

2.2 Le noyau de neptunium est obtenu dans un état excité. Quelle est la nature du rayonnement émis et quelle est son origine ?

Le noyau fils excité, noté ${}^{237}_{93}\mathrm{Np}^*$, possède un excédent d'énergie. Il revient à son état fondamental en cédant cette énergie sous forme d'un photon :

${}^{237}_{93}\mathrm{Np}^* \longrightarrow {}^{237}_{93}\mathrm{Np} + \gamma$

Rayonnement γ : onde électromagnétique de très grande fréquence, due à la désexcitation du noyau fils.

COMPRENDRE
L'émission γ ne modifie ni A ni Z : le noyau reste le même, il perd seulement de l'énergie.

2.3.1 Dans la loi $N(t) = N_0\, e^{-\lambda t}$, que représentent N_0 et λ ? Préciser leur unité dans le système international.

N_0 est le nombre de noyaux radioactifs présents dans l'échantillon à la date $t = 0$. C'est un nombre : il n'a pas d'unité.

λ est la constante radioactive, caractéristique du noyau étudié. Le produit λt est sans dimension, donc λ est l'inverse d'un temps.

N_0 : nombre initial de noyaux, sans unité ; λ : constante radioactive, en s^{-1}.

MÉTHODE
L'argument d'une exponentielle n'a jamais d'unité : cela donne directement l'unité de λ.

2.3.2 Citer les trois paramètres dont dépend le nombre de désintégrations dans un échantillon.

Pendant une durée Δt courte devant la demi-vie, le nombre de désintégrations est $\lambda\, N\, \Delta t$.

Trois paramètres : la nature du noyau (constante λ), le nombre N de noyaux présents et la durée Δt de comptage.

COMPRENDRE
La température, la pression ou l'état chimique de l'échantillon n'ont aucune influence sur la radioactivité.

2.4.1 À partir de $A(t) = \lambda\, N(t)$, en déduire la loi de décroissance de l'activité $A(t)$.

$A(t) = \lambda\, N(t) = \lambda\, N_0\, e^{-\lambda t}$

$A(t) = A_0\, e^{-\lambda t}$ avec $A_0 = \lambda\, N_0$

COMPRENDRE
L'activité suit la même décroissance exponentielle que le nombre de noyaux, avec la même constante λ, donc la même demi-vie.

2.4.2 Que représente une activité d'un becquerel ?

L'activité est le nombre moyen de désintégrations qui se produisent par seconde dans l'échantillon.

$1\ \mathrm{Bq}$ correspond à une désintégration par seconde, en moyenne.

PIÈGE
Oublier « en moyenne » : la désintégration est un phénomène aléatoire, le nombre mesuré fluctue d'un comptage à l'autre.

2.4.3 Deux sources d'américium 241 ont pour masses m et $2m$. Ont-elles la même activité ? Justifier.

$A = \lambda\, N$ et la constante λ est la même pour les deux sources (même noyau).

Le nombre de noyaux est proportionnel à la masse : $N = \dfrac{m}{M}\, N_A$. La source de masse $2m$ contient donc deux fois plus de noyaux.

Non : la source de masse $2m$ a une activité double de celle de masse m.

2.5.1 Définir le temps de demi-vie radioactive $t_{1/2}$ d'un échantillon.

$t_{1/2}$ est la durée au bout de laquelle la moitié des noyaux radioactifs initialement présents se sont désintégrés : $N(t_{1/2}) = \dfrac{N_0}{2}$.

PIÈGE
Au bout de deux demi-vies, il ne reste pas zéro noyau mais un quart : le nombre de noyaux est divisé par deux à chaque demi-vie.

2.5.2 En déduire, en fonction de l'activité présente A_0, l'activité d'un échantillon d'américium 241 dans 433 ans, puis dans 1299 ans.

Données utiles $t_{1/2} = 433$ ans

L'activité est proportionnelle à N : elle est aussi divisée par 2 à chaque demi-vie.

$433 \text{ ans} = t_{1/2}$: $A = \dfrac{A_0}{2}$.

$1299 \text{ ans} = 3 \times 433 \text{ ans} = 3\,t_{1/2}$: $A = \dfrac{A_0}{2^3}$.

$A(433 \text{ ans}) = \dfrac{A_0}{2}$ et $A(1299 \text{ ans}) = \dfrac{A_0}{8}$

MÉTHODE
Après n demi-vies, $A = \dfrac{A_0}{2^n}$. Commencer par chercher si la durée est un multiple entier de $t_{1/2}$: aucun calcul d'exponentielle n'est alors nécessaire.

3.1.1 Écrire l'équation de la réaction entre le béryllium 9 et une particule α, qui donne un noyau $^{A}_{Z}X$ et un neutron. Déterminer la nature de ce noyau.

Données utiles $_4$Be ; $_6$C ; particule α : $^4_2$He (2.1)

$^9_4\text{Be} + {}^4_2\text{He} \longrightarrow {}^{A}_{Z}\text{X} + {}^1_0\text{n}$

Conservation de A : $9 + 4 = A + 1$, donc $A = 12$. Conservation de Z : $4 + 2 = Z + 0$, donc $Z = 6$: c'est l'élément carbone.

$^9_4\text{Be} + {}^4_2\text{He} \longrightarrow {}^{12}_{6}\text{C} + {}^1_0\text{n}$: le noyau X est du carbone 12.

PIÈGE
Le neutron s'écrit $^1_0$n : il compte pour un nucléon mais ne porte aucune charge.

3.1.2 a. En s'appuyant sur l'exemple $^1_0\text{n} + {}^{235}_{92}\text{U} \longrightarrow {}^{91}_{36}\text{Kr} + {}^{142}_{56}\text{Ba} + 3\,{}^1_0\text{n}$, définir une réaction de fission nucléaire. b. Expliquer pourquoi la source d'américium n'est utile qu'au démarrage.

a. La fission est une réaction nucléaire provoquée : un noyau lourd (ici l'uranium 235), heurté par un neutron, se casse en deux noyaux plus légers (krypton et baryum) en libérant des neutrons et de l'énergie.

b. La source américium-béryllium fournit les premiers neutrons, qui provoquent les premières fissions. Chaque fission libère à son tour plusieurs neutrons (trois dans l'exemple), capables de provoquer de nouvelles fissions.

La réaction s'entretient seule (réaction en chaîne) : la source extérieure de neutrons devient inutile.

COMPRENDRE
La fission est provoquée par un choc, alors qu'une désintégration radioactive est spontanée.

3.2.1 À l'aide des questions 2.3 et 2.5.1, montrer que $\lambda = \dfrac{\ln 2}{t_{1/2}}$.

D'après 2.5.1 : $N(t_{1/2}) = \dfrac{N_0}{2}$. D'après 2.3 : $N(t_{1/2}) = N_0\,e^{-\lambda t_{1/2}}$.

Donc $e^{-\lambda t_{1/2}} = \dfrac{1}{2}$, soit $-\lambda\,t_{1/2} = \ln\dfrac{1}{2} = -\ln 2$.

$\lambda\,t_{1/2} = \ln 2$, d'où $\lambda = \dfrac{\ln 2}{t_{1/2}}$

PIÈGE
Ne pas perdre le signe : $\ln\dfrac{1}{2} = -\ln 2$, et les deux signes « $-$ » se simplifient.

3.2.2 En utilisant la relation donnée en 2.4, calculer le nombre N_0 de noyaux présents au moment de la mesure.

Données utiles $A_0 = 2{,}1 \times 10^7$ Bq ; $\ln 2 = 0{,}7$; $t_{1/2} = 433$ ans $\approx 10^{10}$ s

$A_0 = \lambda N_0 = \dfrac{\ln 2}{t_{1/2}} N_0$, donc $N_0 = \dfrac{A_0\, t_{1/2}}{\ln 2}$, avec $t_{1/2}$ en secondes.

$$N_0 = \frac{2{,}1 \times 10^7 \times 10^{10}}{0{,}7} = 3{,}0 \times 10^{17}$$

$N_0 = 3{,}0 \times 10^{17}$ noyaux

PIÈGE
Laisser $t_{1/2}$ en années : l'activité est en becquerels, c'est-à-dire en désintégrations par seconde, donc λ doit être en s^{-1}.

COMPRENDRE
Sans calculatrice : $2{,}1 \div 0{,}7 = 3$, puis $10^7 \times 10^{10} = 10^{17}$. Deux chiffres significatifs comme A_0, mais les arrondis imposés ($\ln 2$, 10^{10} s) n'assurent qu'un ordre de grandeur.

3.2.3 En déduire la quantité de matière n_0 d'américium 241 et la masse m_0 de l'échantillon, en grammes.

Données utiles $N_0 = 3{,}0 \times 10^{17}$ (3.2.2) ; $N_A = 6{,}0 \times 10^{23}\ \text{mol}^{-1}$; $M = 241\ \text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$

$$n_0 = \frac{N_0}{N_A} = \frac{3{,}0 \times 10^{17}}{6{,}0 \times 10^{23}} = 5{,}0 \times 10^{-7}\ \text{mol}$$

$$m_0 = n_0\, M = 5{,}0 \times 10^{-7} \times 241 = 1{,}2 \times 10^{-4}\ \text{g}$$

$n_0 = 5{,}0 \times 10^{-7}$ mol et $m_0 = 1{,}2 \times 10^{-4}$ g, soit environ 0,1 mg

COMPRENDRE
Environ un dixième de milligramme : l'ordre de grandeur annoncé par l'énoncé pour la source du détecteur. Une masse infime suffit à produire vingt millions de désintégrations par seconde.

MÉTHODE
Sans calculatrice : $3{,}0 \div 6{,}0 = 0{,}50$ et $10^{17-23} = 10^{-6}$, puis $5 \times 241 = 1205$, soit $1205 \times 10^{-7} \approx 1{,}2 \times 10^{-4}$.