

PROBLEME DE RADIOACTIVITE

La radioactivité dans le corps humain

Par le biais de processus naturels (respiration, nourriture) des substances radioactives sont ingérées dans le corps humain, notamment ^{40}K , ^{14}C et ^{222}Rn . Nous voulons ici estimer la radioactivité de votre corps générées par ces éléments.

Cette copie sera agrafée à la feuille d'examen. Si les cadres ne sont pas assez grands, vous pourrez compléter votre réponse sur la feuille d'examen.

Données:

- Nombre d'Avogadro: $N_{\text{AV}} = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
- Vitesse de la lumière en vide: $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
- $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
- $1 \text{ u.m.a.} = 1,66056 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 931,5 \text{ MeV}/c^2$
- $m({}_2^4\text{He}) = 4,002 \text{ u.m.a.}$
- $m({}_{19}^{40}\text{K}) = 39,963999 \text{ u.m.a.}$
- $m({}_{20}^{40}\text{Ca}) = 39,962591 \text{ u.m.a.}$
- $m({}_{18}^{40}\text{Ar}) = 39,962384 \text{ u.m.a.}$
- $m({}_{84}^{218}\text{Po}) = 217,9629 \text{ u.m.a.}$
- $m({}_{86}^{222}\text{Rn}) = 221,9704 \text{ u.m.a.}$

26 pts

24 pts $\hat{=}$ 100%

Le potassium 40 ($^{40}_{19}\text{K}$)

10,72 % du $^{40}_{19}\text{K}$ se désintègre en $^{40}_{18}\text{Ar}$ par capture électronique vers un état excité de l'argon que l'on notera $^{40}_{18}\text{Ar}^*$ puis dans son état fondamental $^{40}_{18}\text{Ar}$ par émission d'un photon d'une énergie de $E_\gamma = 1,461 \text{ MeV}$. Le reste de potassium $^{40}_{19}\text{K}$ (89,28 %) subit une désintégration β^- en $^{40}_{20}\text{Ca}$. La période du $^{40}_{19}\text{K}$ résultant de ces deux modes de désintégration est $T = 1,227 \cdot 10^9$ ans.

1) Décrire rapidement le processus de capture électronique.

1 pt

Un e^- du cortège électronique est capturé par le noyau et un proton se transforme en neutron : il y a émission d'un neutrino électronique.

La CE permet aux noyaux trop riches en protons de se rapprocher de la ligne de stabilité. C'est un processus qui peut rentrer en compétition avec la désintégration β^- .

Ce processus est accompagné par l'émission des photons Röntgen ($E = \text{O}(keV)$) quand le cortège électronique se réarrange.

jusqu'à

1 pt

bonus

2) Écrire la réaction de capture électronique subie par le $^{40}_{19}\text{K}$ et conduisant au $^{40}_{18}\text{Ar}^*$. On indiquera le numéro atomique (Z) ainsi que le nombre total de protons et de neutrons ($A = Z + N$) de l'argon.

1 pt

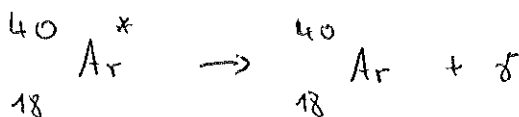


$$A = 40 \quad ; \quad Z = 18$$

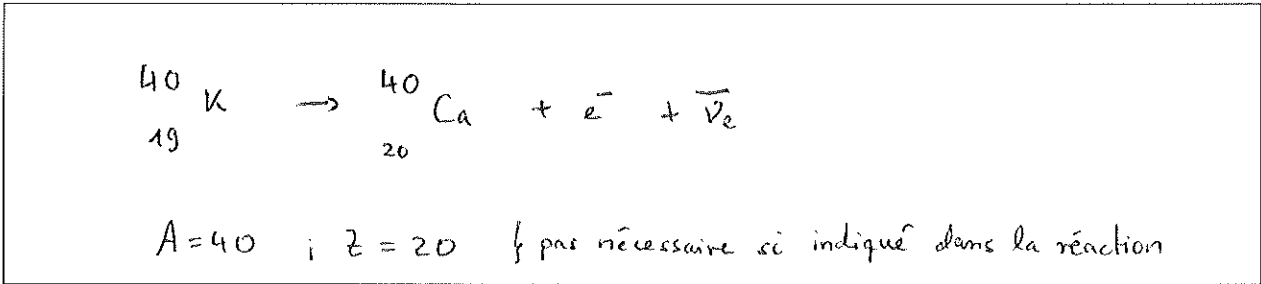
0,5 pt

3) Écrire la réaction de désintégration gamma de l'argon excité vers son état fondamental.

1 pt



4) Écrire la réaction de désintégration β^- du potassium 40 en calcium. On indiquera le numéro atomique (Z) ainsi que le nombre total de protons et de neutrons ($A = Z + N$) du calcium.



1 pt

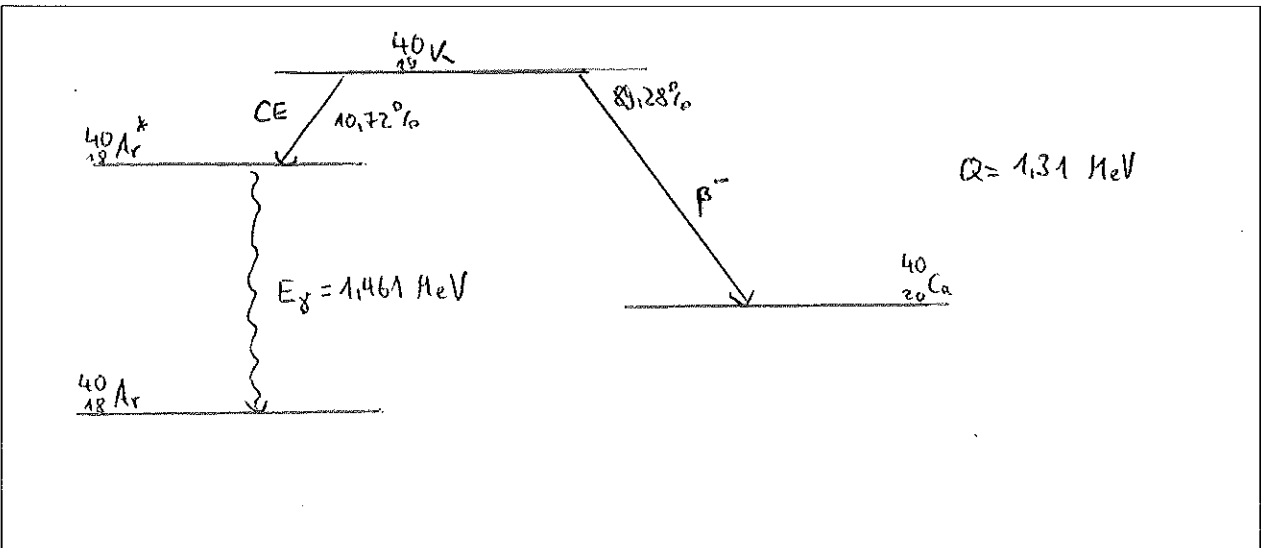
5) Calculer le bilan de l'énergie de masse Q_β en MeV de la désintégration en question 4).

$$Q_{\beta^-} = [m({}_{19}^{40}\text{K}) - m({}_{20}^{40}\text{Ca})] \cdot c^2$$

$$= [39,963993 - 39,962591] \times 931,5 \text{ MeV} = 1,31 \text{ MeV}$$

1 pt

6) Faites un schéma représentant sur la même figure toutes les désintégrations du potassium 40 discuté avant [états à considérer: ${}_{19}^{40}\text{K}$, ${}_{18}^{40}\text{Ar}^*$, ${}_{18}^{40}\text{Ar}$, ${}_{20}^{40}\text{Ca}$]. Indiquer tous les numéros atomiques (Z) et les nombres de protons et de neutrons (A) ainsi que l'énergie E_γ du photon.



2 pts

On pourrait aussi calculer $Q_{CE} = [m({}_{19}^{40}\text{K}) - m({}_{18}^{40}\text{Ar})] c^2 = 1,5 \text{ MeV}$

Pourquoi $E_\gamma < Q_{CE}$? $\rightarrow E_{\gamma_2}$

Recoil noyaux

E_{γ} Röntgen

Le potassium dans le corps humain

Le potassium existe dans la nature sous forme de trois isotopes: ^{39}K (93,26 %, stable), ^{41}K (6,73 %, stable), ^{40}K (0,0117 %, instable).

7) Calculer la constante de désintégration radioactive du potassium 40 en secondes $^{-1}$.

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T} = \frac{\ln 2}{1,227 \cdot 10^9 \text{ ans}}$$
$$= 1,791 \times 10^{-17} \frac{1}{\text{s}}$$

1 pt

8) Calculer le nombre d'atomes N dans un 1 gramme de potassium 40.

~~269729~~

$$N = \frac{1 \text{ g}}{m(^{40}\text{K})} = \frac{1 \text{ g}}{39,963999 \text{ u.m.a}} \approx \frac{1 \text{ g}}{40 \times 1,66 \cdot 10^{-24} \text{ g}} = 1,5 \cdot 10^{22}$$

1 pt

~~269729 Bq~~

9) Quel est l'unité S.I. de l'activité? Déterminer l'activité de 1 g de potassium 40 en unités S.I.

Unité S.I. : 1 Bq = 1 désintégration par seconde

$$a = \lambda N = 1,791 \times 10^{-17} \times 1,5 \times 10^{22} \text{ Bq}$$
$$= 269729 \text{ Bq}$$

1 pt

10) Le potassium est essentiel pour le fonctionnement des muscles et du système nerveux. Dans un corps humain il y a environ 2 g potassium par kg de masse corporelle. Pour une personne de 70 kg, quelle est la masse de potassium ^{40}K dans le corps? Calculer l'activité de cette masse.

$$70 \times 2 \text{ g} = 140 \text{ g} \quad \text{potassium}$$

$$m(^{40}\text{K}) = 140 \text{ g} \times 0,0117 \% = 140 \text{ g} \times 0,000117$$

$$= 0,01638 \text{ g}$$

$$\Rightarrow a = 0,01638 \times 263729 \text{ Bq} = 4418 \text{ Bq}$$

1 pt

11) En supposant que la moitié des photons sort du corps et que l'énergie moyenne des électrons émis lors de la désintégration β^- est environ 40 % de l'énergie maximale, estimez l'énergie moyenne \bar{E} absorbée dans le corps par désintégration.

$$E_{\text{max}}^{\beta^-} = Q_{\beta^-} = 1,31 \text{ MeV}$$

$$\bar{E} = \underset{\substack{\text{prob. dés. } \beta^- \\ \downarrow}}{0,8928} \times 0,4 \times 1,31 \text{ MeV} + \underset{\substack{\text{probabilité CE} \\ \downarrow}}{0,1072} \times 0,5 \times 1,461 \text{ MeV}$$

$$= 0,55 \text{ MeV}$$

1 pt

12) Quel est l'unité S.I. de la dose absorbée D ? Calculer la dose absorbée D dans une personne de 70 kg pendant un an en unités S.I. en utilisant l'énergie moyenne déterminée en 11). Si vous n'avez pas trouvé cette énergie moyenne utiliser $\bar{E} = 0,5 \text{ MeV}$. Si vous n'avez pas trouvé l'activité en 10) supposer qu'il y a 4500 désintégrations par seconde.

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$$

$$E = 4500 \times 0,5 \times 365 \times 24 \times 60 \times 60 = 7,1 \times 10^{10} \text{ MeV} = 1,14 \times 10^{-8} \text{ MJ}$$

$$D = \frac{1,14 \times 10^{-8} \text{ MJ}}{70 \text{ kg}} = 1,6 \times 10^{-4} \text{ Gy} = 0,16 \text{ mGy}$$

1 pt

1 pt

13) Expliquer en quelques mots la différence entre la dose absorbée D et la dose équivalente H . Préciser la valeur de H (reçue pendant un an) en unités S.I.

La dose absorbée est la dose physique.

Pour tenir compte des effets biologiques dus à l'irradiation qui diffèrent selon la nature des rayonnements on utilise la dose équivalente permettant une meilleure estimation des risques.

On introduit ainsi un facteur de qualité Q_R qui relie la dose absorbée à la dose équivalente.

$$H = 0,16 \text{ mSv} = 1,6 \times 10^{-4} \text{ Sv}$$

Le carbone 14 dans le corps humain

Le carbone 14 est émetteur β^- . Sa période est de $T = 5730 \pm 40$ ans. Le carbone existe dans la nature sous forme de trois isotopes: ^{12}C (98,89 %, stable), ^{13}C (1,11 % stable), ^{14}C ($10^{-10}\%$, instable)¹. On fait l'hypothèse que la proportion R de l'isotope radioactif ^{14}C par rapport aux isotopes stables [le rapport $^{14}\text{C}/(^{12}\text{C}+^{13}\text{C})$] dans le corps est le même que dans l'atmosphère: $R \simeq 10^{-12}$.

14) Dans le corps humain le carbone est beaucoup plus abondant que le potassium et contribue à environ 23% de la masse corporelle. Sachant que l'activité de 1 kg de carbone est environ 190 en unités S.I., calculer l'activité de carbone 14 dans une personne de 70 kg.

1pt

$$a = 70 \times 0,23 \times 190 \text{ Bq} = 3059 \text{ Bq}$$

15) Expliquer en quelques mots la méthode de la datation au carbone 14.

1pt

- * On suppose que le rapport $R \simeq 10^{-12}$ est demeuré stable dans l'atmosphère au cours des 100 000 dernières années.
- * Dans les organismes vivants on a environ le même rapport $R \simeq 10^{-12}$.
- * Après la mort, le carbone n'est plus assimilé. Le carbone 14 se désintègre et le rapport R et par conséquent l'activité change.

16) Donner l'expression générale de la variation temporelle de l'activité.

1pt

$$a(t) = a_0 e^{-\lambda t}$$

¹Les pourcentages sont pour l'air.

17) En 1991, dans une région alpine à la frontière Italie/Autriche à 3200 mètres d'altitude on a trouvé un corps momifié (appelé par la presse Ötzi). L'activité d'un échantillon d'Ötzi s'élevait à 58% de l'activité d'un échantillon avec la même quantité de ^{12}C prélevé d'un organisme vivant aujourd'hui. Calculer le temps passé depuis la mort d'Ötzi.

1pt

$$\frac{a(t)}{a_0} = 0,58 = e^{-\lambda t} = \left(\frac{1}{2}\right)^{t/T}$$

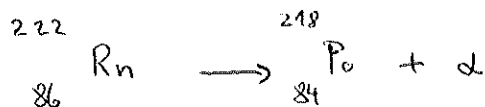
$$\Rightarrow \frac{t}{T} = \frac{\ln 0,58}{\ln 0,5} \Rightarrow t = 0,79 T = 4500 \text{ ans}$$

Le radon 222 dans le corps humain

Le radon est le gaz noble le plus lourd avec tous les isotopes instables. L'isotope le plus abondant et de plus longue vie est le ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ avec une période de $T = 3,8$ jours.

18) Le radon 222 se désintègre en polonium (Po) par désintégration α . Ecrire l'équation de cette désintégration. On indiquera le numéro atomique (Z) ainsi que le nombre total de protons et de neutrons ($A = Z + N$) du polonium.

1pt



19) Pour estimer l'activité du radon dans le corps humain supposons que le volume pulmonaire soit 5 litres et que l'air dans les poumons soit régulièrement remplacé dans son intégralité. Dans ces conditions l'abondance relative du radon dans les poumons est égale à l'abondance moyenne du radon dans l'atmosphère terrestre, c.a.d., 1 atome de radon sur 10^{21} molécules. Calculer le nombre N_{Rn} d'atomes de radon 222 dans les poumons. (Rappel: Le volume molaire d'un gaz idéal dans des conditions normales est 22,4 l.)

1pt

$$\begin{aligned} 1 \text{ mole air} &\hat{=} 22,4 \text{ l} \\ \Rightarrow \text{On a } &\frac{5}{22,4} \text{ moles d'air} \\ N_{\text{air}} &= \frac{5}{22,4} \times 6,022 \times 10^{23} \quad (\text{molécules d'air}) \\ \Rightarrow N_{\text{Rn}} &= 10^{-21} N_{\text{air}} = \text{~~134,4~~ } 134,4 \text{ atomes de radon 222} \\ &\quad \text{dans les poumons} \end{aligned}$$

20) Calculer l'activité du radon 222 dans votre corps en unités S.I. Combien de désintégrations expecte-on par jour?

1 pt

$$a = \frac{\ln 2}{218 \text{ jours}} \times N_{\text{Rn}} = 2,18 \times 10^{-4} \text{ Bq} = 24,5 \text{ jour}^{-1}$$

⇒ Il y a environ 24 désintégrations du radon 222 dans les poumons par jour.

21) Calculer en J et en MeV l'énergie libérée par la désintégration d'un noyau de radon 222. [Utiliser les masses données à la première page.]

1 pt

$$\Delta m = m \left({}_{84}^{218} \text{Po} \right) + m \left({}_2^4 \text{He} \right) - m \left({}_{86}^{222} \text{Rn} \right)$$

$$= (217,9629 + 4,002 - 221,9704) \text{ u.m.a.} = -0,0055 \text{ u.m.a.}$$

$$E = -\Delta m c^2 = 0,0055 \times 931,5 \text{ MeV} = 5,12 \text{ MeV}$$

$$= 8,12 \times 10^{-13} \text{ J}$$

22) Citez trois méthodes pour se protéger de la radioactivité en séances de TP.

1,5 pts

- * Réduire le temps d'exposition
- * Augmenter la distance à la source
- * Utiliser un écran
- * se laver les mains
- * ---