

PIS GE2, Option « Energie Nucléaire ».

Physique du noyau et radioactivité, Examen.

25 novembre 2022

Durée : 2h00.

Documents autorisés : une feuille manuscrite recto-verso.

Calculatrices autorisées.

Les questions sont rédigées en italiques. Les 3 exercices sont indépendants. Il y a beaucoup de questions : chacune constitue une étape élémentaire de raisonnement ou de calcul, ce qui facilite l'évaluation.

1 Questions de cours (QCM, 5 points)

Recopier la référence de la bonne réponse sur votre copie.

Question 1.1 :

La particule α est :

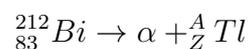
a : un atome d'Hélium 4

b : une molécule mâle d'Hélium

c : un noyau d'Hélium 4

Question 1.2 :

Le bismuth 212 peut subir une désintégration α pour se transformer en thallium. L'équation bilan est la suivante :



Ce qui caractérise (ou définit) le thallium est :

a : $Z = 81$

b : $Z = 82$

c : $A = 208$

d : son léger goût de framboise

Question 1.3 :

Le lien quantitatif entre la constante radioactive λ (en s^{-1}) et la période de demi-vie T (en s) est :

a : $T = \log(\lambda) \times 2$

b : $T = \frac{\log(2)}{\lambda}$

c : $T = \lambda \times \log(2)$

d : $\Delta = b^2 - 4ac$

Question 1.4 :

Le cuivre 67 (${}^{67}_{29}\text{Cu}$) est un émetteur β^- . Le noyau fils issu de sa désintégration est un noyau de :

a : Cobalt 63 (${}^{63}_{27}\text{Co}$)

b : Arzémétium 4312 (${}^{4312}_{123}\text{Az}$)

c : Zinc 67 (${}^{67}_{30}\text{Zn}$)

d : Cuivre 66 (${}^{66}_{29}\text{Cu}$)

Question 1.5 :

L'électron-volt (symbole eV) est :

a : la monnaie de l'Electrostan

b : un super-héros

c : une unité de puissance

d : une unité d'énergie

2 Masses, Energies et Réactions nucléaires (10 points)

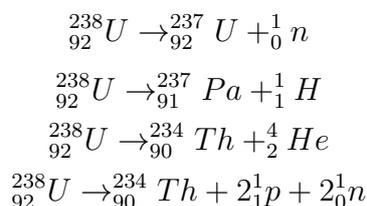
On donne ci-dessous les masses **au repos**, dans leur état fondamental du neutron et de quelques **atomes** :

- neutron (1_0n) : $m = 1.008664$ u
- hydrogène 1 (1_1H) : $m = 1.007825$ u
- hélium 4 (4_2He) : $m = 4.002603$ u
- lithium 7 (7_3Li) : $m = 7.016003$ u
- bore 10 (${}^{10}_5B$) : $m = 10.02936$ u
- bore 11 (${}^{11}_5B$) : $m = 11.009305$ u
- thorium 234 (${}^{234}_{90}Th$) : $m = 234.043599$ u
- protactinium 237 (${}^{237}_{91}Pa$) : $m = 237.051023$ u
- uranium 237 (${}^{237}_{92}U$) : $m = 237.048728$ u
- uranium 238 (${}^{238}_{92}U$) : $m = 238.050786$ u

a Pourquoi le noyau n'émet-il pas ses constituants ?

On peut légitimement se demander pourquoi un noyau « instable » car possédant trop de neutrons ou de protons va plutôt subir une conversion interne (modes β) à nombre de nucléons constant, ou va émettre une (assez) grosse particule α plutôt que de simplement laisser partir un neutron ou un proton. Nous allons illustrer pourquoi dans le cas particulier de l'uranium 238 (qui s'avère très général).

On va envisager les possibilités suivantes :



Question 2.1 :

Calculer la masse d'un uranium 237 plus un neutron non lié.

Question 2.2 :

Comparer à la masse de l'uranium 238, conclure quant-à l'aspect exoénergétique ou endoénergétique d'une telle réaction.

Question 2.3 :

Calculer la masse d'un protactinium 237 plus un proton¹.

Question 2.4 :

Comparer à la masse de l'uranium 238, conclure quant-à l'aspect exoénergétique ou endoénergétique d'une telle réaction.

1. on considère la masse de l'atome d'hydrogène 1 dans le calcul. **Bonus** si vous expliquez pourquoi

Question 2.5 :

Calculer la masse d'un thorium 234 plus une particule α .

Question 2.6 :

Comparer à la masse de l'uranium 238, conclure quant-à l'aspect exoénergétique ou endoénergétique d'une telle réaction.

Question 2.7 :

Calculer la masse d'un thorium 234 plus deux neutrons séparés plus deux protons séparés.

Question 2.8 :

Comparer à la masse de l'uranium 238, conclure quant-à l'aspect exoénergétique ou endoénergétique d'une telle réaction.

Question 2.9 :

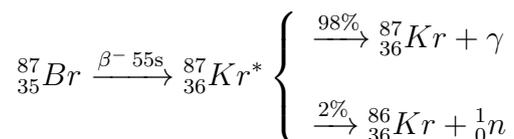
Pour la seule possibilité exoénergétique, calculer l'énergie dégagée, à exprimer en MeV ($1 u \simeq 931.5 \text{ MeV} \cdot c^{-2}$).

Complément

Si le système constitué de ${}^A_{Z-1}X$ et d'un neutron libre était moins massif que A_ZX , cela signifierait que le dernier neutron de A_ZX aurait une énergie de liaison négative et ne serait pas lié. C'est similaire pour le système ${}^A_{Z-1}X + {}^1_1p$ par rapport à A_ZX : un noyau existant à l'état lié ne peut pas perdre un de ses nucléons spontanément. On comprend l'intérêt d'étudier les énergies de liaisons à $A = \text{cte}$ et donc les fameuses « paraboles ».

La seule possibilité est de « placer » le noyau A_ZX dans un état excité ${}^A_ZX^*$ avec une énergie d'excitation supérieure à l'énergie de liaison du dernier nucléon. Par exemple la réaction entre une particule α de haute énergie et le béryllium 9 conduit à un carbone 13 excité jusqu'à 9 MeV au dessus de l'énergie de liaison du dernier neutron : cette réaction donne au final un carbone 12 et un neutron libre et sert de source de neutrons dans les réacteurs.

Un autre phénomène **très important** vis-à-vis de la cinétique et du pilotage des réacteurs nucléaires est l'émission de neutrons « retardés » après fission. Certains produits de fission donnent après une décroissance β^- un noyau émetteur de neutrons. Exemple typique :



2. on considère la masse de l'atome d'hélium 4 dans le calcul. **Bonus** si vous expliquez pourquoi

b Autour du bore

Le bore (numéro atomique $Z = 5$) existe sous deux isotopes stables : le bore 10 et le bore 11. Dans les réacteurs nucléaires, on l'utilise pour absorber les neutrons afin de contrôler la criticité du réacteur, mais aussi dans un des types de sondes permettant de mesurer les flux de neutrons en réacteur.

Question 2.10 :

Calculer l'énergie de liaison par nucléon lié du bore 10. L'exprimer en MeV.

Question 2.11 :

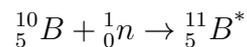
Calculer l'énergie de liaison par nucléon lié du bore 11. L'exprimer en MeV.

Question 2.12 :

Le bore 10 est un très bon absorbeur de neutron utilisé pour contrôler les réacteurs nucléaires : pourquoi absorbe-t-il si bien les neutrons ?

Question 2.13 :

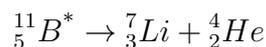
On s'intéresse à la réaction



A partir des tables de masse, calculer l'énergie d'excitation du noyau formé.

Question 2.14 :

Le noyau formé dans un état excité peut généralement se désexciter par émission d'un photon γ . Pour le cas particulier de la capture de neutron sur le bore 10, le processus va conduire à la « fission » du bore 11 selon :



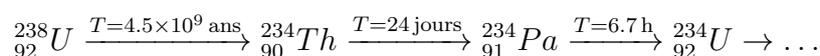
A partir des tables de masse, justifier que cette réaction est exo-énergétique si on part de l'état excité pour le bore 11 calculé précédemment.

Question (pas trop facile) 2.15 :

En utilisant les lois de conservation idoines, calculer dans le référentiel du centre de masse les énergies cinétiques des produits après la réaction. (On n'a pas besoin d'utiliser les équations relativistes, car l'énergie de réaction mise en jeu est faible devant l'énergie de masse des produits).

3 L'activité d'un échantillon peut croître au court du temps ! (5 points)

On va s'intéresser à l'évolution au cours du temps d'un fût contenant à $t = 0$ de l'uranium appauvri qu'on considère composé uniquement d'uranium 238 pur (${}^{238}_{92}\text{U}$). L'uranium 238 est un émetteur α de période de demi-vie 4.5 milliards d'année. Le produit de la désintégration est donc du thorium 234 (${}^{234}_{90}\text{Th}$). Le thorium 234 est radioactif β^- , de période de demi-vie 24 jours. Le produit de la désintégration est donc du protactinium 234 (${}^{234}_{91}\text{Pa}$). Le protactinium 234 est radioactif β^- , de période de demi-vie 6.7 heures. Le produit de la désintégration est donc de l'uranium 234 (${}^{234}_{92}\text{U}$), lui-même radioactif α de période de demi-vie 250000 ans. On s'arrêtera là, car on s'intéresse aux deux premières années de l'évolution. En résumé :



On note $N_{U8}(t)$ le nombre de noyaux d'uranium 238 au cours du temps, et N_0 le nombre de noyaux initiaux. On note λ_{U8} la constante radioactive de l'uranium 238.

De même, on note $N_{T4}(t)$ le nombre de noyaux de thorium 234 au cours du temps et λ_{T4} la constante radioactive du thorium 234.

Enfin, on note $N_{P4}(t)$ le nombre de noyaux de protactinium 234 au cours du temps et λ_{P4} la constante radioactive du protactinium 234.

Question 3.1 :

Calculer l'activité massique en Bq.kg^{-1} de l'uranium 238 pur.

Question 3.2 :

Calculer les constantes radioactives en s^{-1} pour les trois premiers noyaux de la série : λ_{U8} , λ_{T4} et λ_{P4} .

Question 3.3 :

Ecrire l'équation différentielle donnant l'évolution temporelle du nombre de noyaux d'uranium 238 dans le fût.

Question 3.4 :

Donner sa solution et calculer la fraction de noyaux d'uranium 238 restant au bout de deux ans (rapport entre le nombre de noyaux au bout de deux ans et le nombre de noyaux à $t = 0$).

Question 3.5 :

Ecrire les équations différentielles qui régissent la variation du nombre de noyaux de thorium 234 au cours du temps, et du nombre de noyaux de protactinium 234 au cours du temps.

Question 3.6 :

Ces équations portent le nom d'équations de Bateman de la filiation simple. Leur solution, dans le cas présent est :

$$\begin{cases} N_{T4}(t) = \frac{\lambda_{U8}}{\lambda_{T4}} N_0 (1 - \exp(-\lambda_{T4}t)) \\ N_{P4}(t) = \frac{\lambda_{U8}}{\lambda_{P4}} N_0 (1 - \exp(-\lambda_{P4}t)) - \frac{\lambda_{U8}}{\lambda_{P4} - \lambda_{T4}} N_0 (\exp(-\lambda_{T4}t) - \exp(-\lambda_{P4}t)) \end{cases}$$

Calculer pour $t = 1$ jour, $t = 24$ jours et $t = 2$ ans la fraction de noyaux de thorium et de protactinium par rapport à N_0 (autrement dit, donner N_{T4}/N_0 et N_{P4}/N_0 pour les trois valeurs de temps).

Question 3.7 :

Donner l'activité massique totale dans le fût (en $Bq.kg^{-1}$) aux temps $t = 1$ jour, $t = 24$ jours et $t = 2$ ans.

Question 3.8 :

Commenter.