

TRAVAUX DIRIGES DE PHYSIQUE

LA RADIOACTIVITE

" Le maître force l'exclave à travailler et en travaillant, l'exclave devient le maître de la nature."
Travaillez, travaillez pour vous-même, c'est là la clé du succès.

Exercice 1 :

Evaluer les propositions suivantes par vrai ou faux.

1. La radioactivité est une transformation nucléaire spontanée.
2. La radioactivité est toujours une transformation lente.
3. Le nombre de noyaux désintégrés d'une substance radioactive ne dépend que du temps.
4. L'activité d'une substance radioactive est proportionnelle au temps.
5. La demi-vie d'un élément radioactif est aussi la durée au bout de laquelle la masse d'un échantillon de cet élément diminue de moitié.
6. Au cours de toute réaction nucléaire, les lois de conservation de la charge totale et du nombre total de nucléons sont toujours respectées.
7. Les réactions de fission et de fusion sont des réactions nucléaires spontanées.
8. Dans une bombe à hydrogène, la réaction de fusion qui se produit est amorcée par une réaction de fission.
9. L'énergie du soleil est due à une réaction de fusion transformant l'isotope de l'hydrogène en hélium ${}^4_2\text{He}$.
10. Le rayonnement γ est beaucoup plus pénétrant que les rayonnements α et β . Il provoque de nombreuses ionisations dans l'organisme et est de ce fait très dangereux.

Exercice 2 :

Préciser pour chacune des questions suivantes, la (ou les) proposition(s) juste(s).

1. Une réaction nucléaire :
 - a. est accélérée par l'utilisation d'un catalyseur,
 - b. est ralentie par une augmentation de pression,
 - c. ne dépend pas des facteurs habituels des transformations chimiques tels que la pression, la température et le catalyseur.
2. Une réaction nucléaire est :
 - a. toujours spontanée,
 - b. toujours provoquée,
 - c. selon le cas, spontanée ou provoquée.
3. La loi de décroissance radioactive s'exprime par la relation :
 - a. $N=N_0e^{-\lambda t}$,
 - b. $N=N_0e^{\lambda t}$,
 - c. $N=N_0(1-e^{-\lambda t})$,
4. La période radioactive ou demi vie d'un élément radioactif est la durée nécessaire pour que le nombre des noyaux initialement présents dans l'échantillon :
 - a. diminue de moitié,
 - b. diminue du quart,

- c. augmente de la moitié,
5. Au cours d'une réaction nucléaire, il y a :
- seulement conservation du nombre total de nucléons,
 - seulement conservation de la charge électrique totale,
 - à la fois conservation du nombre total de nucléons et conservation de la charge électrique totale.

Exercice 3 :

L'uranium 238 donne plusieurs désintégrations successives : x désintégrations de type α et y désintégrations de type β^- et se transforme en $^{226}_{88}\text{Ra}$. Le radium 226, lui même radioactif, conduit par plusieurs désintégrations successives à un isotope stable $^{206}_{82}\text{Pb}$, après avoir subi x' désintégrations de type α et y' désintégrations de type β^- . Déterminer x , y , x' et y' .

Exercice 4 :

Etant radioactif, le polonium $^{218}_{84}\text{Po}$ se désintègre en un noyau de plomb ^A_ZPb avec émission d'une particule α .

- Ecrire l'équation de la réaction de désintégration en précisant les lois de conservation qui la régissent.
- Le noyau ^A_ZPb est radioactif de période T . Un échantillon de a une masse $m_0 = 40$ mg à un instant de date $t = 0,54$ minutes plus tard, il n'en reste que $m = 10$ mg. Déterminer la valeur de la période T ainsi que celle de la constante radioactive λ de ^A_ZPb .

Exercice 5 :

L'isotope $^{226}_{88}\text{Ra}$ du radium est radioactif; il émet un rayonnement α et se transforme en un isotope du radon ^A_ZRn .

- Ecrire l'équation de cette désintégration en précisant les valeurs de Z et A .
- Les masses des noyaux intervenant dans la désintégration précédente sont respectivement : $M(\alpha) = 4,0015$ u ; $M(^A_Z\text{Rn}) = 221,9703$ u ; $M(^{226}_{88}\text{Ra}) = 225,9771$ u.
Calculer l'énergie totale libérée par la désintégration d'un noyau de radium $^{226}_{88}\text{Ra}$.
On donne : $1\text{u} = 1,66 \cdot 10^{-27}$ kg ; $c = 3 \cdot 10^8$ m.s⁻¹.

Exercice 6 :

- Sous l'impact d'un neutron lent ^1_0n , un noyau d'uranium $^{235}_{92}\text{U}$ peut subir avec libération d'énergie la fission suivante :

$$^{235}_{92}\text{U} + ^1_0\text{n} \longrightarrow ^{146}_x\text{U} + ^{87}_{35}\text{U} + y^1_0\text{n}$$
 - Déterminer x et y en précisant les lois utilisées.
 - Expliquer l'origine de l'énergie libérée au cours de cette réaction nucléaire.
- Le bombardement d'un noyau $^{238}_{92}\text{U}$ par une particule X déclenche une série de réactions nucléaires dont les trois premières sont :

$$^{238}_{92}\text{U} + X \longrightarrow ^{239}_{92}\text{U}$$

$$^{239}_{92}\text{U} \longrightarrow ^{239}_{93}\text{Np} + Y$$

$$^{239}_{93}\text{Np} \longrightarrow ^A_Z\text{Pu} + Y$$
 - Identifier les particules X et Y .
 - Déterminer A et Z du noyau de plutonium.

Exercice 7 :

Le brome $^{77}_{35}\text{Br}$ est un émetteur β^+ , il donne comme noyau fils un isotope de l'élément sélénium Se, avec émission éventuelle d'un rayonnement γ . Sa période radioactive est de 57 h. Il est utilisé en imagerie médicale.

- Ecrire l'équation traduisant la désintégration d'un noyau de brome 77.

- Calculer la constante radioactive λ .
- Un échantillon a une activité initiale de $5,7 \cdot 10^{15}$ Bq. Calculer le nombre moyen N_0 de noyaux au moment de la mesure.

Exercice 8 :

A-

- Le polonium 210 ($^{210}_{84}\text{Po}$) est radioactif α . Ecrire l'équation de la réaction de sa désintégration sachant que le noyau fils est un isotope du plomb.
- En admettant que toute l'énergie libérée par la réaction est communiquée aux particules formées sous forme d'énergie cinétique et que le rapport des énergies cinétiques du noyau de plomb et de la particule α est égal à l'inverse du rapport de leur masse, calculer l'énergie $E_c(\alpha)$ de la particule α émise et celle $E_c(\text{Pb})$ du noyau fils, immédiatement après la désintégration. On exprimera ces énergies en MeV. Calculer la vitesse de la particule α et celle du noyau fils.

On donne : $M(\alpha) = 4,0015 \text{ u}$; $M(^{210}_{84}\text{Po}) = 209,9368 \text{ u}$; $M(^{206}_{82}\text{Pb}) = 205,9295 \text{ u}$; $1 \text{ u} = 931,5 \text{ MeV} \cdot \text{c}^{-2} \text{ kg}$; $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

B- L'isotope 137 du césium $^{137}_{55}\text{Cs}$ est radioactif β^- . Le noyau ^A_ZBa obtenu à la suite de cette désintégration peut être soit dans l'état fondamental, soit dans un état excité à la suite duquel il reviendra à son état fondamental.

I- On ne considèrera que le cas où le noyau obtenu est dans son état fondamental.

- Déterminer A et Z et écrire l'équation de la réaction nucléaire qui a lieu.
- En utilisant les données consignées dans le tableau suivant, calculer en MeV et en joules l'énergie libérée au cours de cette désintégration.

Particule ou noyau	$^0_{-1}\text{e}$	$^{137}_{55}\text{Cs}$	^A_ZBa
Masse en u	$5,5 \cdot 10^{-4}$	136,8768	136,8743

On rappelle que $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. Dire, sans calcul, sous quelles formes se retrouve cette énergie ?

II- On considère maintenant toutes les désintégrations possibles du césium 137. On rappelle que le nombre N des noyaux restants à l'instant t s'exprime en fonction du nombre N_0 des noyaux présents à l'instant $t = 0$ par la relation $N = N_0 e^{-\lambda t}$, où λ est une constante égale dans ce cas à $8,4 \cdot 10^{-10} \text{ s}^{-1}$. Calculer en secondes et en années la période T.

Exercice 9 :

L'élément carbone est composé principalement de deux isotopes stables, le $^{12}_6\text{C}$ (98,9%) et le $^{13}_6\text{C}$ (1,1%). D'autre part, le carbone contient encore une très petite partie de l'isotope radioactif de période $T = 5730$ années, qui est formé continuellement sous forme de dioxyde de carbone dans l'atmosphère terrestre, par effet des radiations cosmiques et qui se mélange par l'intermédiaire du cycle CO_2 de la nature, aux isotopes $^{12}_6\text{C}$ et $^{13}_6\text{C}$.

- Donner la relation entre la constante radioactive λ et la période T.
- Pour le taux de désintégration du carbone participant au cycle CO_2 de la nature, on trouve la valeur de 13,6 désintégrations par minute et par gramme de carbone. Quand une matière végétale, par exemple un arbre, meurt elle ne participe plus au cycle CO_2 de la nature. Par conséquent, le taux de décomposition de carbone diminue.
Pour un morceau de bois ayant fait partie d'un navire Viking, on mesure en 1983, 12 désintégrations par minute et par gramme de carbone. En quelle année l'arbre ayant fourni ce bois a-t-il été abattu ?
- Quelle est la valeur du rapport isotopique $\frac{^{12}_6\text{C}}{^{14}_6\text{C}}$ du carbone participant au cycle CO_2 de la nature ?
On donne : Une année = 365 jours. Nombre d'Avogadro $\mathcal{N} = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$.

Exercice 10 :

Le radium $^{226}_{88}\text{Ra}$ se désintègre en émettant une particule α et en produisant un noyau ^A_ZX dans son état fondamental.

1. Sachant que ^A_ZX est un isotope du radon, écrire l'équation bilan de la désintégration en explicitant les règles utilisées.
2. Le noyau ^A_ZX est également radioactif. On désire déterminer la période radioactive de ce noyau. A l'instant $t = 0$, on dispose d'un échantillon contenant N_0 noyaux ; à l'instant t , ce nombre devient N . On obtient le tableau de mesures suivant :

t (heures)	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
$\ln N$	6,90	6,75	6,60	6,45	6,30	6,15	6,00	5,85	5,70	5,55	5,40

- a. Tracer la courbe : $\ln N = f(t)$.
 - b. Dédire de la courbe obtenue l'expression de la loi de décroissance radioactive.
 - c. Déterminer la période radioactive T en jours du noyau ^A_ZX .
3. Sachant que le rapport de l'énergie cinétique du noyau formé et de l'énergie cinétique de la particule α émise est égal à l'inverse du rapport de leurs masses, déterminer la valeur de ce rapport. Quelle remarque vous suggère-t-il ?
 4. En supposant que l'énergie libérée par la désintégration se trouve en totalité sous forme d'énergie cinétique, calculer la vitesse de la particule α sachant que l'énergie libérée vaut 4,5 MeV.
 5. En réalité, le phénomène de désintégration est accompagné de l'émission d'une radiation électromagnétique de longueur d'onde $\lambda = 2,5 \cdot 10^{-11}$ m.
 - a. Interpréter ce phénomène.
 - b. Calculer la valeur de l'énergie cinétique de la particule α compte tenu de l'émission du photon.

On donne :

- Masse du noyau d'hélium = 4,0015 u.
- Masse du noyau de radon = 221,9771 u.
- $1 \text{ u} = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$; $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$; $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$; $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

Exercice 11 :

L'image scintigraphique utilise des traceurs et des marqueurs. Un traceur est une substance qui peut se localiser de façon sélective au niveau d'une structure particulière de l'organisme. Un marqueur est un noyau qui se prête aisément à une détection externe. Il émet des rayonnements γ qui sont détectés à l'extérieur de l'organisme à l'aide d'une caméra à scintillation (gammacamera).

L'association d'un traceur et d'un marqueur permet grâce au marqueur, de suivre l'évolution du traceur dans l'organisme.

Pour réaliser des scintigraphies thyroïdiennes, l'iode radioactif est le traceur physiologique de référence, il sert à la fois de traceur et de marqueur. On utilise pour cela soit l'iode 131 ($^{131}_{53}\text{I}$) soit l'iode 123 ($^{123}_{53}\text{I}$). Il est possible, après administration de faibles doses d'iode 131, par exemple, d'obtenir une scintigraphie de la thyroïde reflétant la distribution de la radioactivité au sein de l'organe.

I-

1. L'iode 123 est produit par réaction nucléaire entre des deutons ^2_1H de haute énergie et du tellure $^{122}_{52}\text{Te}$. Ecrire l'équation de cette réaction nucléaire.
2. L'iode 131 de demi vie $T = 8$ jours est émetteur β^- et γ . Ecrire l'équation de sa désintégration sachant qu'il se forme un noyau de xénon. Calculer en MeV l'énergie libérée par cette réaction nucléaire.

On donne : $m(^{131}_{53}\text{I}) = 130,87705 \text{ u}$; $m(^{131}_{54}\text{Xe}) = 130,87545 \text{ u}$; $m(^4_2\text{He}) = 4,0015 \text{ u}$. $1 \text{ u} = 931,5 \text{ MeV.c}^{-2}$.

3. Pour une scintigraphie thyroïdienne, un patient adulte doit ingérer par voie orale une quantité d'iode ^{131}I d'activité A_0 . Le délai entre l'administration du traceur et la réalisation des images est de 24 h. Quelle est en fonction de A_0 , l'activité A de l'iode ^{131}I dans le corps au moment où les images sont réalisées ?

II-

1. L'iode ^{123}I est émetteur γ pur de demi vie $T' = 13,2$ h. Pour une scintigraphie thyroïdienne, il faut injecter à un patient adulte une quantité d'iode ^{123}I d'activité égale à $6,4 \cdot 10^6$ Bq. Tracer la courbe représentant A en fonction du temps. On représentera simplement les activités correspondant à T , $2T$, $3T$, $4T$?
2. La réalisation des images se fait entre 2 et 4 h après administration de l'iode. Déterminer graphiquement l'activité de l'iode ^{123}I au bout de 4 h. Que vaudrait-elle si on réalisait, comme dans le cas de l'iode ^{131}I , une image 24 h après l'injection ?

Exercice 12 :

Le cobalt $^{60}_{27}\text{Co}$ est radioactif β^- , avec une demi vie $T = 5,27$ ans. Le noyau fils est émis dans un état excité. Il revient à l'état fondamental en émettant un rayonnement γ . En médecine, ce rayonnement est utilisé pour traiter certains cancers en irradiant de l'extérieur, les tumeurs afin de les détruire. On utilise ainsi des bombes à cobalt. Le noyau fils du cobalt 60 se désexcite par deux rayonnements de longueurs d'onde $1,6 \cdot 10^{-12}$ m et $1,8 \cdot 10^{-12}$ m.

1. Ecrire l'équation de la désintégration du cobalt 60 et celles de la désexcitation de son noyau fils.
2. Au bout de quelle durée la bombe à cobalt aura-t-elle perdu 90% de son activité ?
3. Chaque électron émis possède une énergie cinétique de $4,5 \cdot 10^{-14}$ J qu'il transmet intégralement au tissu humain qui l'absorbe.
Quelle est l'énergie transmise par unité de temps au tissu humain par une bombe d'activité $1,7 \cdot 10^{18}$ Bq ? On suppose que seuls 10% des électrons émis sont dirigés vers la cible.
4. Quelle est l'énergie transmise aux tissus humains pendant une exposition de 0,8 seconde ?
5. Si l'on considère qu'une exposition de 10 secondes à proximité immédiate d'une source dont l'activité est voisine de 10^{14} Bq est dangereuse, que peut-on dire de celle nécessaire à l'utilisation de la bombe à cobalt ?

Exercice 13 :

I-

1. Dans un réacteur nucléaire, un noyau d'uranium $^{235}_{92}\text{U}$ capte un neutron lent et subit une fission symbolisée par l'équation suivante :

$$^{235}_{92}\text{U} + {}^1_0\text{n} \longrightarrow {}^Z_Z\text{Sr} + {}^A_{54}\text{Xe} + 2{}_0^1\text{n}$$
Déterminer les nombres A et Z en précisant les lois utilisées.
2. Dans le même réacteur, l'isotope $^{238}_{92}\text{U}$ de l'uranium peut capter un neutron rapide et se transformer en isotope 239 de l'uranium. Le noyau obtenu est radioactif. Par deux désintégrations successives spontanées de type β^- , il se transforme en plutonium. Ecrire l'équation de chacune des désintégrations β^- et préciser les nombres de masse et de charge du noyau de plutonium formé.
3. a) L'isotope $^{238}_{92}\text{U}$ de l'uranium est radioactif α . Ecrire l'équation de sa désintégration radioactive et identifier le noyau X formé en se référant au tableau suivant :

Élément	Hélium	Neptunium	Uranium	Protactinium	Thorium
Symbole du noyau	${}^4_2\text{He}$	${}^{236}_{93}\text{Np}$	${}^{234}_{92}\text{U}$	${}^{231}_{91}\text{Pa}$	${}^{230}_{90}\text{Th}$
Masse du noyau (en u)	4,0015	235,9956	233,9904	230,9860	229,9737

- b) Calculer en MeV et en joule l'énergie libérée par la désintégration d'un noyau d'uranium 234, puis celle libérée par un échantillon d'un gramme de cette substance radioactive.
- c) En admettant que l'énergie libérée par la désintégration est répartie entre le noyau X et la particule α sous forme d'énergie cinétique et que le rapport des énergies cinétiques du noyau X et de la particule α est égal à l'inverse du rapport de leurs masses :

- déduire l'énergie cinétique de la particule α ainsi que celle du noyau X.
- calculer la vitesse de la particule α .

- d) Certaines particules α émises ont en réalité une énergie cinétique égale à 13 MeV. L'écart entre cette valeur et la valeur calculée est expliqué par l'émission de radiations γ . En déduire l'énergie de chacun des photons α émis en même temps que ces particules α et calculer la longueur d'onde λ de l'onde associée.

II- L'uranium 238 est à l'origine d'une famille radioactive qui conduit à l'isotope stable du plomb $^{206}_{82}\text{Pb}$. Les désintégrations successives s'accompagnent d'une émission de particules α ou de particules β^- . Les noyaux intermédiaires étant d'une durée de vie suffisamment courte, on peut négliger leur présence dans les produits de la transformation. On assimile donc l'ensemble à une réaction unique :

$$^{238}_{92}\text{U} \longrightarrow ^{206}_{82}\text{Pb} + x\alpha + y\beta^-$$

1. Déterminer les coefficients x et y.
2. On suppose qu'à l'instant $t = 0$ de formation de minerai contenant de l'uranium 238, celui-ci ne contient aucun noyau de plomb 206.

On désignera par :

N_0 : le nombre initial de noyaux d'uranium 238.

N : le nombre moyen de noyaux d'uranium 238 qui subsistent à l'instant t .

N' : le nombre moyen de noyaux de plomb présents à l'instant t .

- a. Exprimer le nombre moyen N' de noyaux de plomb présents à l'instant t dans le minerai considéré en fonction de t , λ et N .
- b. Exprimer l'âge du minerai en fonction de la période T de l'uranium $^{238}_{92}\text{U}$ et du rapport $\frac{N'}{N}$.
On pourra supposer $t \ll T$ et pour ε petit, on prendra $e^\varepsilon \approx 1 + \varepsilon$.
- c. Application numérique : sachant qu'à l'instant t , l'échantillon du minerai contient 1g d'uranium 238 et 10 mg de plomb, calculer l'âge du minerai.

On donne :

- $T(^{238}_{92}\text{U}) = 4,5.10^9$ ans,
- $M(\text{U}) = 238$ g.mol⁻¹,
- $M(\text{Pb}) = 206$ g.mol⁻¹,
- $\ln 2 = 0,693$,
- $1 \text{ u} = 931,5 \text{ MeV}.c^{-2}$,
- $1 \text{ MeV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$,
- nombre d'Avogadro
- $\mathcal{N} = 6,02.10^{23}$,
- constante de Planck $h = 6,62.10^{-34} \text{ J.s}$,
- célérité de la lumière $c = 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$.