



UNIVERSITÉ
DE LORRAINE



enim
École Nationale
d'Ingénieurs de Metz

Introduction à la physique nucléaire

PhysNucl

ENIM – 3A

Travaux Dirigés

Prof. Antoine GUITTON

antoine.guitton@univ-lorraine.fr

Version : juillet, 2026

Exercice I Les Curie

I.1 La radioactivité naturelle

À partir des travaux d'Henri Becquerel sur l'uranium, c'est en 1898 que Marie et Pierre Curie découvrent la propriété atomique de certains éléments lourds d'émettre spontanément un rayonnement. Marie Curie donnera le nom de « radioactivité » à cette propriété persistante dans tous les états chimiques et physiques de la matière. C'est également en 1898 qu'ils annoncent la découverte de deux nouveaux éléments radioactifs : le polonium et le radium. Leurs travaux seront couronnés par deux prix Nobel, l'un en 1903, l'autre en 1911.

Données : ${}^{226}_{88}\text{Ra} : m_{\text{Ra}} = 225.9791 \text{ u}, M_{\text{Ra}} = 226.0 \text{ g mol}^{-1}$; ${}^{222}_{86}\text{Rn} : m_{\text{Rn}} = 221.9703 \text{ u}$; ${}^4_2\text{He} : m_{\text{He}} = 4.00150 \text{ u}$; ${}_0^1\text{n} : m_{\text{n}} = 1.008665 \text{ u}$; ${}_1^1\text{p} : m_{\text{p}} = 1.007276 \text{ u}$; $1 \text{ u} = 1.66606 \times 10^{-27} \text{ kg}$; $N_A = 6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$; $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J s}$; $1 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J}$

1. Le becquerel est une unité de mesure utilisée en radioactivité, donner sa définition.

Le noyau de ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ se désintègre spontanément en donnant un noyau de ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ lui-même radioactif. Cette désintégration s'accompagne de l'émission d'un rayonnement γ de longueur d'onde $6.54 \times 10^{-12} \text{ m}$.

2. Donner la composition du noyau de ${}^{226}_{88}\text{Ra}$.
3. Écrire l'équation de la réaction de désintégration du ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ et préciser le type de radioactivité.
4. Expliquer la présence du rayonnement γ émis lors de la désintégration du ${}^{226}_{88}\text{Ra}$. Quelle information fournit-elle sur le noyau ?
5. Déterminer l'énergie libérée par la désintégration d'un noyau de ${}^{226}_{88}\text{Ra}$, on la notera E et on l'exprimera en joules.

L'activité d'un gramme de ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ est égale à $A = 3.70 \times 10^{10} \text{ Bq}$.

6. Déterminer le nombre N de noyaux de ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ présents dans l'échantillon de 1.00 g .
7. Calculer le temps de demi-vie $t_{1/2}$ du ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ en années.
8. Au bout de combien de temps les $3/4$ des noyaux de ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ seront-ils désintégrés ?

I.2 La radioactivité artificielle

Irène et Frédéric Joliot-Curie découvrent en 1934 la radioactivité artificielle, ce qui leur vaudra le rix Nobel de physique en 1935. Ils ont notamment réussi la synthèse du $^{30}_{15}\text{P}$, isotope radioactif du $^{31}_{15}\text{P}$. Le $^{30}_{15}\text{P}$, produit artificiellement, se transforme spontanément par désintégration β^+ en $^{30}_{14}\text{Si}$, noyau obtenu directement dans son état fondamental. La diversité des radioéléments artificiels a permis leur utilisation dans les domaines de la médecine, la biologie, l'astrophysique, la géophysique, la radiothérapie, la datation...

9. Quelle est la différence entre la radioactivité naturelle et la radioactivité artificielle ?
10. Pourquoi le $^{30}_{15}\text{P}$ est-il dit isotope du $^{31}_{15}\text{P}$?
11. Donner le nom et le symbole de la particule émise lors d'une désintégration β^+ .
12. Ecrire l'équation de la désintégration du $^{30}_{15}\text{P}$ en indiquant les lois utilisées.
13. Y a-t-il émission d'un rayonnement lors de la désintégration du $^{30}_{15}\text{P}$? Justifier.

Exercice II Datations

II.1 Datation au $^{14}_6\text{C}$

Isotope radioactif du carbone, le $^{14}_6\text{C}$ est formé continuellement dans la haute atmosphère. Il est très réactif et donne rapidement du dioxyde de carbone qui, en quelques mois, se mélange avec l'ensemble du gaz carbonique de notre atmosphère. Il sera donc assimilé par les plantes au même titre que le gaz carbonique produit avec du carbone stable (les isotopes $^{12}_6\text{C}$ et $^{13}_6\text{C}$). On le retrouvera donc comme constituant de la matière organique des animaux herbivores et carnivores. Vers 1950, le chimiste américain W. Libby¹ a démontré que tous les êtres vivants sont caractérisés par le même rapport du nombre de noyaux de $^{14}_6\text{C}$ au nombre de noyaux de $^{12}_6\text{C}$: $\frac{N^{14}_6\text{C}}{N^{12}_6\text{C}}$. En conséquence, un gramme de carbone pur extrait d'un être vivant présente une activité due au $^{14}_6\text{C}$, voisine de 13,6 désintégrations par minute, ce qui correspond à « un âge zéro ». Dans un animal ou un végétal mort (tronc d'arbre, coquille fossile, os... trouvé dans une caverne), le $^{14}_6\text{C}$ assimilé par l'animal ou la plante quand il était vivant, décroît exponentiellement en fonction du

1. Libby, W. F., Anderson, E. C., & Arnold, J. R. (1949). *Age determination by radiocarbon content : world-wide assay of natural radiocarbon*. Science, 109(2827), 227-228.

temps du fait de sa radioactivité à partir de l'instant de sa mort. La comparaison² de cette activité résiduelle aux 13,6 désintégrations par minute fournit directement l'âge de l'échantillon fossile. Au bout de 40 millénaires, il reste moins de 1 % du $^{14}_6\text{C}$ que contenait initialement un échantillon fossile ; cette teneur résiduelle devient trop faible pour être déterminée avec précision.

1. Pourquoi les noyaux de symboles $^{12}_6\text{C}$, $^{13}_6\text{C}$ et $^{14}_6\text{C}$ sont-ils appelés isotopes ?
2. Donner la composition du noyau de symbole $^{14}_6\text{C}$.
3. Écrire l'équation de désintégration du $^{14}_6\text{C}$ en $^{14}_7\text{N}$ en supposant que le noyau fils n'est pas obtenu dans un état excité. S'agit-il d'une radioactivité α , β^+ ou β^- ?
4. Rappeler la loi de décroissance radioactive. On notera $N(t)$ le nombre de noyaux de $^{14}_6\text{C}$ restant dans l'échantillon à la date t , λ est la constante radioactive relative à la désintégration étudiée et N_0 le nombre initial de noyaux de $^{14}_6\text{C}$.

Le temps de demi-vie de l'isotope $^{14}_6\text{C}$ est $t_{1/2} = 5.73 \times 10^3$ ans.

5. Qu'appelle-t-on temps de demi-vie $t_{1/2}$ d'un échantillon radioactif ?
6. Montrer que $\lambda \cdot t_{1/2} = \ln 2$.
7. Calculer la valeur de λ dans le cas du $^{14}_6\text{C}$, en gardant $t_{1/2}$ en années.

Plusieurs articles scientifiques parus en 2004 relatent les informations apportées par la découverte d'Ötzi, un homme naturellement momifié par la glace et découvert, par des randonneurs, en septembre 1991 dans les Alpes italiennes. Pour dater le corps momifié, on a mesuré l'activité d'un échantillon de la momie. On a trouvé une activité égale à 7,16 désintégrations par minute pour une masse équivalente à 1.0 g de carbone pur.

8. Donner l'expression littérale de la durée écoulée entre la mort d'Ötzi et la mesure de l'activité de l'échantillon. Calculer cette durée.

À Obock (en République de Djibouti), des chercheurs ont étudié un corail vieux de vingt mille ans.

9. Ce corail a-t-il pu être daté par la méthode utilisant le $^{14}_6\text{C}$? Justifier la réponse.

2. On suppose que la valeur 13,6 désintégrations par minute, pour un organisme vivant, est restée constante au cours des derniers millénaires.

II.2 Datation au $^{40}_{19}\text{K}$

Pour dater des roches très anciennes, on utilise parfois la méthode potassium-argon. Le $^{40}_{19}\text{K}$, de demi-vie $t_{1/2} = 1.3 \times 10^9$ ans, possède la particularité de se désintégrer en deux noyaux différents : dans 89 % des cas en $^{40}_{20}\text{Ca}$ par désintégration β^- ; dans 11 % des cas en $^{40}_{18}\text{Ar}$ par capture électronique suivie d'un γ de 1.46 MeV. Ce γ joue un rôle important car il sert à identifier les désintégrations du $^{40}_{19}\text{K}$ vers l' $^{40}_{18}\text{Ar}$. La désintégration β^- conduisant au $^{40}_{20}\text{Ca}$ n'est pas accompagnée de γ . Ils n'émergent généralement pas du corps vivant ou de la roche où ils sont produits et leurs énergies ne sont pas caractéristiques.

10. Écrire l'équation de désintégration du $^{40}_{19}\text{K}$ en $^{40}_{18}\text{Ar}$ et en $^{40}_{20}\text{Ca}$.
11. Quel pourcentage de noyaux de $^{40}_{19}\text{K}$ reste-t-il dans une roche au bout de 4 fois le temps de demi-vie ?
12. On suppose que la teneur résiduelle minimale permettant d'effectuer une datation avec le $^{40}_{19}\text{K}$ est également de 1 % de la teneur initiale. En comparant l'âge de la Terre, qui est de 4.5×10^9 ans, à la demi-vie du $^{40}_{19}\text{K}$, préciser si la méthode de datation par le $^{40}_{19}\text{K}$ permet de mesurer l'âge de la Terre. Justifier la réponse.

Exercice III Les détecteurs de fumée

Certains détecteurs de fumée, équipant encore de nombreuses installations industrielles, malgré les difficultés de recyclage, utilisent $^{241}_{95}\text{Am}$, de demi-vie $t_{1/2} = 433$ ans. L'américium est un élément dont l'isotope 241 n'existe pas à l'état naturel. Il est produit dans les réacteurs nucléaires à partir du $^{241}_{94}\text{Pu}$ par désintégration β .

1. Écrire l'équation conduisant à la formation de l' $^{241}_{95}\text{Am}$ à partir du $^{241}_{94}\text{Pu}$.
2. Lors de la désintégration d'un noyau d' $^{241}_{95}\text{Am}$, on obtient un noyau de $^{237}_{93}\text{Np}$ et une particule. Écrire l'équation de cette réaction nucléaire. Comment nomme-t-on ce type de désintégration ?
3. Le noyau de neptunium est obtenu dans un état excité. Quelle est la nature du rayonnement alors émis ? Quelle est son origine ?

Un détecteur de fumée est constitué d'une chambre de détection dans laquelle se trouvent deux électrodes sous tension et une source contenant quelques dixièmes de milligrammes d' $^{241}_{95}\text{Am}$. Le rayonnement produit lors de la désintégration de l' $^{241}_{95}\text{Am}$ ionise les

molécules contenues dans l'air de la chambre de détection. Les ions et les électrons obtenus sont attirés par la plaque positive ou négative suivant le signe de leur charge. L'ampère-mètre détecte un courant dans le circuit. Quand de la fumée entre dans la chambre de détection, les ions et les électrons se fixent sur les particules contenues dans la fumée. La modification de la valeur de l'intensité du courant déclenche l'alarme. Afin de déterminer la masse d' $^{241}_{95}\text{Am}$ contenue dans un détecteur, on mesure l'activité de l'échantillon à un instant de date t_0 . On trouve $A_0 = 2.1 \times 10^7 \text{ Bq}$.

4. Calculer le nombre N_0 de noyaux présents au moment de la mesure.
5. En déduire la quantité de matière n_0 d' $^{241}_{95}\text{Am}$ ainsi que la masse m_0 de l'échantillon en grammes. ($M_{Am} = 241 \text{ g mol}^{-1}$)

Exercice IV Mécanisme de fusion de l'hydrogène dans une étoile

La phase de fusion (ou combustion) de l'hydrogène est la plus longue de la vie des étoiles. Si la masse stellaire est comparable ou inférieure à celle du Soleil, la température centrale est inférieure à une vingtaine de millions de degrés celsius. Dans ces conditions, la fusion de deux noyaux d'hydrogène ou proton (^1_1H) produit un noyau de deutérium (^2_1H) qui capture un autre proton et forme un noyau d'Hélium 3 (^3_2He). Finalement, deux noyaux d'Hélium 3 fusionnent en un noyau d'Hélium 4 (^4_2He). L'ensemble de ces réactions constitue la première des chaînes proton-proton ou chaîne p-p, la plus importante dans le cas du Soleil.

1. Écrire la réaction de fusion de deux noyaux d'hydrogène en un noyau de deutérium et une particule que l'on notera sous la forme ^A_ZX . Comment s'appelle cette particule ?
2. Écrire la réaction de fusion d'un noyau de deutérium et d'un proton en un noyau d'hélium 3. Cette fusion s'accompagne de l'émission d'un photon. Comment peut-on interpréter cette émission ?
3. Écrire la réaction de fusion de deux noyaux d'hélium 3 en un noyau d'hélium 4. Cette fusion s'accompagne de l'émission de deux autres noyaux identiques. Lesquels ?
4. Écrire la réaction bilan des trois réactions de fusion précédentes, qui, à partir de noyaux d'hydrogène, permet d'obtenir un noyau d'hélium 4.

On donne les masses des noyaux, en unité de masse atomique : ${}^1_1\text{H} : 1.0073\text{ u}$, ${}^4_2\text{He} : 4.0026\text{ u}$, ${}^0_1\text{e} : 0.0006\text{ u}$

4. Calculer la perte de masse correspondant à cette fusion.
 5. En déduire une estimation, en MeV, de la valeur de l'énergie libérée par nucléon lors de cette fusion.
 6. Le soleil transforme, chaque seconde, 720 millions de tonnes d'hydrogène en hélium
4. Estimer la perte de masse subie, chaque seconde, par le soleil.