

Niveaux: SM PC SVT | Matière: Physique

PROF: Zakaryae Chriki | Résumé N:6

# Noyaux, Masse, Energie



## 1. Equivalence Masse-Energie (Relation de d'Einstein)

En 1905, Albert Einstein postulat l'équivalence entre la masse et l'énergie :

Toute particule de masse  $m$ , au repos, possède une énergie appelé énergie de masse, notée  $E$ .

Energie de masse : énergie potentielle que tout système matériel, de masse  $m$ , possède

$E = m \cdot C^2$	avec	$E$ : énergie en joule (J) $m$ : la masse du corps au repos (Kg) $C$ : la célérité de la lumière dans le vide (m/s), $C = 299792458 \text{ m/s} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
-------------------	------	---



## 2. Des autres unités

### a. L'unité de masse atomique

En physique nucléaire, on exprime la masse d'un noyau ou d'un atome en **unité de masse atomique**, de symbole  $u$  :

$$1u = 1,66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

### b. Unité d'énergie.

En physique nucléaire l'unité joule est unité mal adaptée à la description des transferts dénergétiques. Pour cela on emploie l'**électronvolt (eV)** et ces multiples.

$$1eV = 1,602177 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1MeV = 1,602177 \times 10^{-13} \text{ J}$$

### c. Énergie correspond à la masse atomique.

D'après la relation d'Einstein  $E = m \cdot c^2$  pour une masse de  $1u$  on a  $E = 1,66054 \times 10^{-27} \times (2,9979 \times 10^8)^2 = 1492,42 \times 10^{-15} \text{ J}$

$$E = \frac{1492,42 \times 10^{-15}}{1,602177 \times 10^{-19}} = 931,5 \text{ MeV} \quad \text{Donc} \quad 1u = 931,5/c^2$$

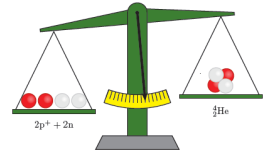
## 3. Défaut de masse :

Le **défaut de masse d'un noyau  $\Delta m$**  est la différence entre la somme des masses de ses nucléons pris séparément et la masse du noyau.

Plu généralement : pour un noyau  ${}^A_Z X$ , le défaut de masse  $\Delta m$  est : 
$$\Delta m = [Zm_p + Nm_n] - m({}^A_Z X)$$

Où  $m_p$  et  $m_n$  sont respectivement la masse d'un proton et la masse d'un neutron.  $\Delta m$  est toujours positif

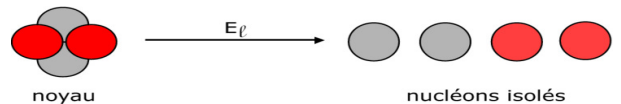
Défaut de masse



## 4. Energie de liaison d'un noyau :

L'**énergie de liaison  $E_l$**  d'un noyau atomique est l'énergie qu'il faut fournir au noyau au repos pour le dissocier en ses **nucléons** constitutifs pris au repos. ( $E_l$  est une grandeur positive.)

$$E_l = \Delta m(X) \cdot c^2 = [(Z \cdot m_p + (A-Z) \cdot m_n) - m({}^A_Z X)] \cdot c^2$$



## 5. Energie de liaison par nucléon

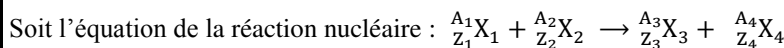
L'énergie de liaison par nucléon : Pour comparer la stabilité de différents noyaux, il faut utiliser les énergies de liaison par nucléon, soit

$$\mathcal{E} = \frac{E_l}{A} \quad \text{avec} \quad \begin{array}{l} E_l : \text{Energie de liaison} \\ A : \text{Nombre de nucléons} \end{array}$$

### N.B

Un noyau est d'autant plus stable que son énergie de liaison par nucléon est grande.

## 6. Réaction nucléaire :



$\Delta m$  : la variation de masse entre les produits et les réactifs de la transformation nucléaire

$$\Delta m = \sum m_{\text{Produits}} - \sum m_{\text{Réactifs}}$$
$$\Delta m = m(X_3) + m(X_4) - (m(X_1) + m(X_2))$$

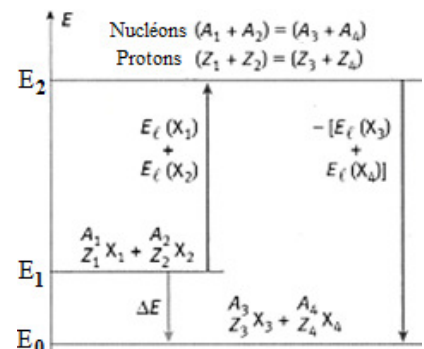
Expression d' énergie de la transformation (désintégration ou de la réaction)

$$\Delta E = [m(X_3) + m(X_4)] - [m(X_1) + m(X_2)] \cdot c^2$$

Autre expression de  $E_0$  en fonction des énergies de liaisons

$$\Delta E = \sum E_l (\text{Réactifs}) - \sum E_l (\text{Produits})$$

$$\Delta E = [E_l(X_1) + E_l(X_2)] - [E_l(X_3) + E_l(X_4)]$$





- Les noyaux instables peuvent évoluer de deux manières :
  - Les noyaux lourds ( $A > 195$ ) peuvent se briser en deux noyaux plus légers appartenant au domaine de stabilité.
  - Ils subissent une réaction nucléaire de fission.

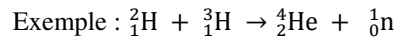
Certains noyaux légers  $1 < A < 20$

( ${}^1_1\text{H}$ ,  ${}^2_1\text{H}$ ,  ${}^3_1\text{H}$ ) peuvent fusionner pour donner un noyau placé plus bas dans le diagramme.

- Ce sont les réactions nucléaires de fusion

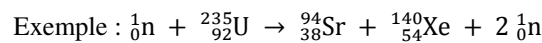
### 8. La fusion nucléaire.

- La fusion est une réaction nucléaire au cours de laquelle deux noyaux légers s'unissent pour former un noyau lourd.
- La fusion est une réaction nucléaire provoquée qui libère de l'énergie.



### 9. La fission nucléaire.

- La fission est une réaction nucléaire au cours de laquelle un neutron lent (neutron thermique) brise un noyau lourd pour former deux noyaux plus légers.
- La fission est généralement une réaction nucléaire provoquée qui libère de l'énergie.
- La réaction peut ainsi continuer et même s'accélérer, on est en présence d'une réaction en chaîne.



## EXERCICE 1

La radioactivité est utilisée dans plusieurs domaines comme la médecine où l'on peut diagnostiquer la maladie par imagerie médicale en utilisant des substances radioactives comme le fluorodéoxyglucose (en abrégé FDG) qui contient du fluor radioactif  ${}^{18}_9\text{F}$ .

Après avoir injecté le FDG par voie intraveineuse à un patient, on peut suivre les rayonnements émis à l'aide d'une caméra spéciale.

### Données:

Noyau	${}^{14}_7\text{N}$	${}^{18}_8\text{O}$	${}^{18}_9\text{F}$	${}^{18}_{10}\text{Ne}$
Énergie de liaison par nucléon $\frac{E_L}{A}$ (MeV / nucléon)	7,473	7,765	6,629	7,338
Demi vie du fluor ${}^{18}_9\text{F}$ : $t_{1/2} = 110$ min				

### 1. Désintégration du noyau de fluor ${}^{18}_9\text{F}$

Le fluor  ${}^{18}_9\text{F}$  est radioactif  $\beta^+$ .

1.1. Écrire l'équation de désintégration du fluor  ${}^{18}_9\text{F}$  en précisant le noyau fils.

1.2. Recopier sur votre copie le numéro de la question et écrire la lettre correspondante à la seule proposition vraie parmi:

<b>a</b>	Le noyau de fluor ${}^{18}_9\text{F}$ est constitué de 18 neutrons et 9 protons
<b>b</b>	La masse du noyau ${}^{18}_9\text{F}$ est inférieure à la somme des masses de ses nucléons
<b>c</b>	L'unité de l'énergie de liaison d'un noyau est le (MeV / nucléon)
<b>d</b>	La constante radioactive s'exprime par la relation $\lambda = t_{1/2} \cdot \ln 2$

1.3. Déterminer, en justifiant votre réponse, le noyau le plus stable parmi  ${}^{14}_7\text{N}$ ;  ${}^{18}_8\text{O}$ ;  ${}^{18}_{10}\text{Ne}$ .

### 2. Injection du FDG à un patient

Pour réaliser un examen d'imagerie médicale à un patient, on lui injecte une dose de FDG d'activité  $a = 5,0 \cdot 10^8$  Bq.

La dose du FDG a été préparée dans le bloc de médecine nucléaire d'un hôpital à 5 heures du matin pour l'injecter au patient à 10 heures du même jour. L'activité du  ${}^{18}_9\text{F}$  à 5 heures est  $a_0$ .

Vérifier que  $a_0 \approx 3,3 \cdot 10^9$  Bq.

## EXERCICE 2

### Etude d'une réaction de fusion nucléaire

La formation de l'hélium à partir du deutérium et du tritium, qui sont deux isotopes de l'hydrogène, est une réaction de fusion nucléaire spontanée qui se produit continuellement au cœur des étoiles. L'homme essaie sans cesse de reproduire cette réaction au laboratoire afin d'utiliser de façon contrôlée son énorme énergie libérée. Le chemin est encore long pour surmonter les différents obstacles techniques.

On modélise cette réaction nucléaire par l'équation suivante :  ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \longrightarrow {}^A_Z\text{He} + {}^1_0\text{n}$  .

Données :

Particule	deutérium	tritium	hélium	neutron
masse (u)	2,01355	3,01550	4,00150	1,00866

- célérité de la lumière dans le vide :  $c = 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$  ;

- constante de Planck :  $h = 6,626.10^{-34} \text{ J.s}$  ;

-  $1\text{u} = 931,5 \text{ MeV.c}^{-2}$  ;

-  $1\text{MeV} = 1,6.10^{-13} \text{ J}$  .

- Déterminer les nombres A et Z du noyau d'hélium.
- Calculer, en MeV, l'énergie libérée  $E_{\text{lib}}$  lors de cette réaction nucléaire.
- On suppose que toute l'énergie libérée s'est transformée en rayonnement électromagnétique. Déterminer la longueur d'onde  $\lambda$  associée à ce rayonnement.
- Un échantillon de sol contient du tritium radioactif. A la date  $t = 0$ , l'activité de cet échantillon est  $a_0 = 2,0.10^6 \text{ Bq}$  . A l'instant de date  $t_1 = 4\text{ans}$ , cette activité devient égale à  $a_1 = 1,6.10^6 \text{ Bq}$  . Déterminer l'activité  $a_2$  de cet échantillon à l'instant de date  $t_2 = 12,4\text{ans}$  .

## EXERCICE 3

Le noyau de polonium  ${}^{210}_{84}\text{Po}$  se désintègre spontanément pour se transformer en un noyau de plomb  ${}^{206}_Z\text{Pb}$  avec émission d'une particule  $\alpha$  .

Cet exercice se propose d'étudier le bilan énergétique de cette transformation ainsi que l'évolution de cette dernière au cours du temps.

Données :

- Energie de liaison du noyau de polonium 210 :  $E_\ell({}^{210}\text{Po}) = 1,6449.10^3 \text{ MeV}$  ,
- Energie de liaison du noyau de plomb 206 :  $E_\ell({}^{206}\text{Pb}) = 1,6220.10^3 \text{ MeV}$  ,
- Energie de liaison de la particule  $\alpha$  :  $E_\ell(\alpha) = 28,2989 \text{ MeV}$  ,
- On désigne par  $t_{1/2}$  la demi-vie du noyau de polonium 210.

- Ecrire l'équation de cette transformation nucléaire en déterminant le nombre Z.
- Déterminer en MeV l'énergie  $|\Delta E|$  produite lors de la désintégration d'un noyau de  ${}^{210}_{84}\text{Po}$  .
- Soient  $N_0(\text{Po})$  le nombre de noyaux de polonium dans un échantillon à l'instant de date  $t=0$  et  $N(\text{Po})$  le nombre de noyaux restant dans le même échantillon à un instant de date  $t$  .
- 3-1- On désigne par  $N_D$  le nombre de noyaux de polonium désintégrés à l'instant de date  $t=4.t_{1/2}$  .

Choisir la proposition juste parmi les propositions suivantes :

a-  $N_D = \frac{N_0(\text{Po})}{8}$  ; b-  $N_D = \frac{N_0(\text{Po})}{16}$  ; c-  $N_D = \frac{N_0(\text{Po})}{4}$  ; d-  $N_D = \frac{15N_0(\text{Po})}{16}$  .

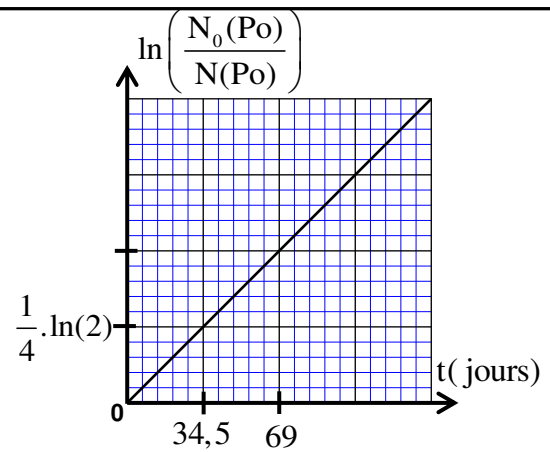
- 3-2- La courbe ci-dessous représente les variations de  $\ln\left(\frac{N_0(\text{Po})}{N(\text{Po})}\right)$  en fonction du temps .

A l'aide de cette courbe, déterminer en jour la demi-vie  $t_{1/2}$ .

3-3-Sachant que l'échantillon ne contient pas du plomb à  $t=0$ , déterminer en jour, l'instant  $t_1$  pour lequel :

$$\frac{N(\text{Pb})}{N(\text{Po})} = \frac{2}{5}, \text{ où } N(\text{Pb}) \text{ est le nombre de noyaux de plomb}$$

formés à cet instant.



#### EXERCICE 4

L'énergie solaire provient de la réaction de fusion des noyaux d'hydrogène. Les physiciens s'intéressent à produire l'énergie nucléaire à partir de la réaction de fusion des isotopes d'hydrogène : deutérium  ${}^2_1\text{H}$  et tritium  ${}^3_1\text{H}$ .

Données : Les masses en unité  $u$  :  $m({}^3_1\text{H})=3,01550 u$  ;  $m({}^2_1\text{H})=2,01355 u$  ;  
 $m({}^4_2\text{He})=4,00150 u$  ;  $m({}^1_0\text{n})=1,00866 u$  ;  $1u = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 931,5 \text{ MeV} \cdot c^{-2}$

#### 1- la radioactivité $\beta^-$ du tritium

Le nucléide tritium  ${}^3_1\text{H}$  est radioactif  $\beta^-$ , sa désintégration donne lieu à un isotope de l'élément Hélium.

1.1- Ecrire l'équation de cette désintégration.

1.2- On dispose d'un échantillon radioactif du nucléide tritium  ${}^3_1\text{H}$  contenant  $N_0$  nucléides à l'instant  $t=0$ .

Soit  $N$  le nombre de nucléides tritium dans l'échantillon à l'instant  $t$ .

Le graphe de la figure 1 représente les variations de  $\ln(N)$  en fonction du temps  $t$ .

Déterminer la demi-vie  $t_{1/2}$  du tritium.

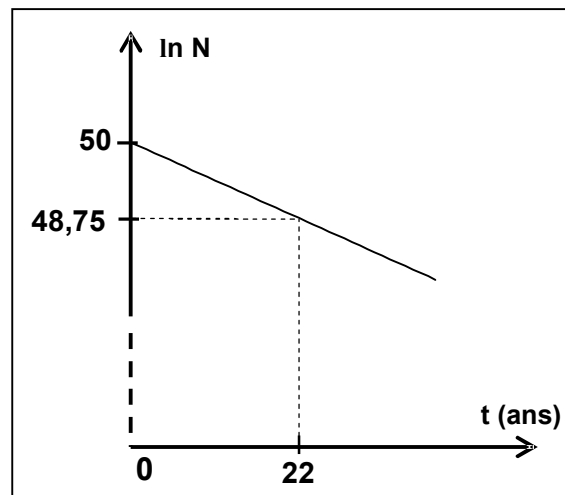


Figure 1

#### 2- Fusion nucléaire

2.1- La courbe de la figure 2 représente les variations de l'opposé de l'énergie de liaison par nucléon en fonction du nombre de nucléons  $A$ .

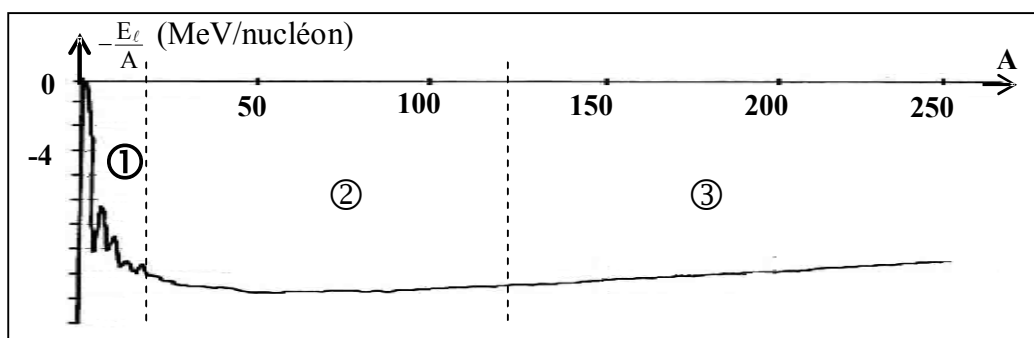


Figure 2

Déterminer, parmi les intervalles ①, ② et ③ indiqués sur la figure 2, celui dans lequel les nucléides sont susceptibles de subir des réactions de fusion. Justifier la réponse.

2.2- L'équation de la réaction de fusion des noyaux de deutérium  ${}^2_1\text{H}$  et de tritium  ${}^3_1\text{H}$  s'écrit :  ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \longrightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$ .

On peut extraire 33mg de deutérium à partir de 1,0L de l'eau de mer.

Calculer, en MeV, la valeur absolue de l'énergie que l'on peut obtenir à partir de la réaction de fusion du tritium et du deutérium extrait de  $1 \text{ m}^3$  de l'eau de mer.

## EXERCICE 4

Les réactions de fusion et de fission sont considérées parmi les réactions qui produisent une grande énergie qu'on peut exploiter dans divers domaines.

- Données :**
- $1\text{MeV} = 1,6022 \cdot 10^{-13} \text{ J}$
  - $m({}_1^1\text{H}) = 1,00728 \text{ u}$  ;  $m({}_2^4\text{He}) = 4,00151 \text{ u}$  ;  $m({}_-1^0\text{e}) = 5,48579 \cdot 10^{-4} \text{ u}$  .
  - $1\text{u} = 931,494 \text{ MeV} \cdot \text{c}^{-2} = 1,66054 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
  - On prend la masse du soleil :  $m_s = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$  .
  - On considère que la masse de l'hydrogène  ${}_1^1\text{H}$  représente 10% de la masse du soleil.

1-On donne dans le tableau ci-dessous les équations de quelques réactions nucléaires :

A	${}_1^2\text{H} + {}_1^3\text{H} \longrightarrow {}_2^4\text{He} + {}_0^1\text{n}$
B	${}_{27}^{60}\text{Co} \longrightarrow {}_{28}^{60}\text{Ni} + {}_{-1}^0\text{e}$
C	${}_{92}^{238}\text{U} \longrightarrow {}_2^4\text{He} + {}_{90}^{234}\text{Th}$
D	${}_{92}^{235}\text{U} + {}_0^1\text{n} \longrightarrow {}_{54}^{139}\text{Xe} + {}_{38}^{94}\text{Sr} + 3{}_0^1\text{n}$

1.1- Identifier, parmi ces équations, celle correspondant à la réaction de fusion.

1.2- En utilisant le diagramme d'énergie ci-contre, calculer :

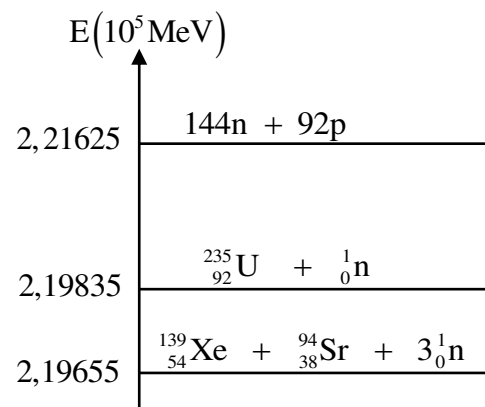
1.2.1- L'énergie de liaison par nucléon du noyau  ${}_{92}^{235}\text{U}$  .

1.2.2- L'énergie  $|\Delta E_0|$  produite par la réaction D.

2-II se produit dans le soleil des réactions nucléaires dues essentiellement à la transformation de l'hydrogène selon l'équation bilan :  $4{}_1^1\text{H} \longrightarrow {}_2^4\text{He} + 2{}_1^0\text{e}$

2.1-Calculer, en joule, l'énergie  $|\Delta E|$  produite par cette transformation.

2.2 -Trouver, en ans, la durée nécessaire à la consommation de tout l'hydrogène présent dans le soleil, sachant que l'énergie libérée chaque année par le soleil selon cette transformation est  $E_s = 10^{34} \text{ J}$  .



## EXERCICE 5

Un réacteur nucléaire fonctionne avec l'uranium enrichie qui est constitué de  $p = 3\%$  de  ${}^{235}\text{U}$  fissible et  $p' = 97\%$  de  ${}^{238}\text{U}$  non fissible.

La production de l'énergie au sein de cette centrale nucléaire est basée sur la fission de l'uranium  ${}^{235}\text{U}$  bombardé par des neutrons.

**Donnés :**  $m({}_{54}^{140}\text{Xe}) = 139,8920 \text{ u}$  ;  $m({}_{38}^{94}\text{Sr}) = 93,8945 \text{ u}$  ;  $m({}_{92}^{235}\text{U}) = 234,9935 \text{ u}$  ;  $m({}_0^1\text{n}) = 1,0087 \text{ u}$

$$1\text{MeV} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J} ; 1\text{u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 931,5 \text{ MeV} \cdot \text{c}^{-2} .$$

Le noyau  ${}^{235}\text{U}$  subit une fission selon l'équation :  ${}_0^1\text{n} + {}_{92}^{235}\text{U} \longrightarrow {}_z^94\text{Sr} + {}_{54}^{140}\text{Xe} + x{}_0^1\text{n}$ .

1- Déterminer  $x$  et  $z$  .

2- Calculer en joule ( J ) l'énergie  $|\Delta E_0|$  libérée par la fission de  $m_0 = 1\text{g}$  de  ${}^{235}\text{U}$  .

3- Pour produire une quantité d'énergie électrique  $W = 3,73 \cdot 10^{16} \text{ J}$  , un réacteur nucléaire de rendement  $r = 25\%$  consomme une masse  $m$  de l'uranium enrichi.

Exprimer  $m$  en fonction de  $W$  ,  $|\Delta E_0|$  ,  $m_0$  ,  $r$  et  $p$  . Calculer  $m$  .

4 - Dans ce réacteur nucléaire se trouve aussi une faible quantité du nucléide  ${}^{234}\text{U}$  qui est radioactif  $\alpha$  .

La mesure de l'activité radioactive, à l'instant  $t = 0$  , d'un échantillon de l'uranium  ${}_{92}^{234}\text{U}$

a donné la valeur  $a_0 = 5,4 \cdot 10^8 \text{ Bq}$  .

Calculer la valeur de l'activité nucléaire de cet échantillon à l'instant  $t = \frac{t_{1/2}}{4}$