

La physique nucléaire et ses applications

I. Rappels et compléments sur les noyaux

1. Sa constitution

- La représentation symbolique d'un noyau est A_ZX , dans laquelle :
 - X est le symbole du noyau et par extension celui de l'atome correspondant.
 - Z est le numéro atomique du noyau, c'est à dire le nombre de protons qu'il contient ; on l'appelle aussi le nombre de charge du noyau.
 - A est le nombre de nucléons que contient le noyau, appelé aussi le nombre de masse (les nucléons existent sous 2 formes: protons et neutrons).
- On rappelle que la charge électrique d'un proton est telle que $q_p = e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C (le coulomb est l'unité dans laquelle s'exprime la charge électrique). La charge totale d'un noyau est donc $Z \cdot e$.
- On rappelle que la masse d'un proton est $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ kg. Un neutron a une masse quasi-identique, et l'électron a une masse environ 2000 fois plus faible. La masse d'un atome est donc quasiment la même que la masse de son noyau qui vaut $A \cdot m_p$ ou $A \cdot m_n$.

2. Isotopes

- Deux noyaux qui ont le même nombre de protons Z, mais un nombre de neutrons ($N = A - Z$) différents sont appelés isotopes. L'isotopie est un phénomène général et concerne presque tous les éléments chimiques.
- Exemple, pour l'élément hydrogène, on connaît les 3 isotopes suivants : 1_1H , 2_1H , 3_1H
- Sur environ 2500 noyaux différents connus à l'heure actuelle, environ 300 sont stables, tous les autres sont instables (on dit aussi radioactifs).

II. Réactions nucléaires spontanées : la radioactivité

1. Radioactivité naturelle ou artificielle

- Qu'est-ce **qu'un noyau radioactif** ? C'est un noyau instable qui a tendance, au bout d'un certain laps de temps, à se transformer spontanément en un autre noyau ; on dit qu'il y a eu une désintégration.

- **La radioactivité est une réaction nucléaire spontanée, aléatoire et inéluctable :**

- spontanée : elle se produit sans besoin d'une intervention humaine,
- aléatoire : il est impossible de prévoir, pour un noyau radioactif donné, à quel moment il va se désintégrer,
- inéluctable : il est certain qu'un noyau radioactif donné subira tôt ou tard une désintégration.

- La radioactivité dite naturelle (c-à-d présente dans la nature) concerne une 60 de noyaux radioactifs. Les plus abondants d'entre sont ${}^{238}U$, ${}^{232}Th$, ${}^{40}K$. Certains d'entre eux sont présents depuis la formation de la Terre et leur population diminue très lentement. D'autres, comme le ${}^{14}_6C$ ont une population quasi constante car ils sont constamment renouvelés par une réaction nucléaire dans la haute atmosphère.

- Mais il existe aussi une radioactivité dite artificielle : elle concerne des noyaux radioactifs non présents dans la nature et donc produits par l'action de l'homme (dans des laboratoires). Historiquement, c'est en 1934 que les français Irène et Frédéric Joliot-Curie ont synthétisé le premier noyau artificiel qui était du ${}^{30}P$.

2. Une mesure de la radioactivité : l'activité

- Toute désintégration d'un noyau radioactif s'accompagne de l'émission d'un rayonnement ; le noyau-père émet une particule et un rayonnement électromagnétique γ . Le décompte des rayonnements perçus par un compteur approprié (par ex compteur du type Geiger-Müller) permet d'accéder

indirectement au nombre de transformations nucléaires subies par une source radioactive sur une durée donnée.

□ On définit l'activité d'une source radioactive comme étant le nombre de désintégrations produites par seconde. On note l'activité A et l'unité dans laquelle on l'exprime est le becquerel (symbole Bq).

1Bq = 1 désintégration par seconde

L'activité d'une source dépend du type de noyaux radioactifs qu'elle contient, du nombre de noyaux présents, de la masse de la source, etc. On a vu qu'elle peut se mesurer à l'aide d'un compteur Geiger-Müller.

□ On donne dans le tableau ci-dessous des ordres de grandeurs de l'activité pour 1kg de substance :

Nature de la substance	Eau douce	Eau de mer	Corps humain	Matériaux de construction	Minerai d'uranium	Déchets nucléaires à faible activité	Plutonium 239
Activité (en Bq)	10^{-1}	10	10^2	10^3	10^7	10^8	10^{12}

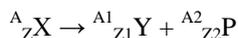
3. Les lois de conservation

□ Contrairement à une transformation chimique, une transformation nucléaire ne conserve pas l'élément chimique : des éléments disparaissent et d'autres apparaissent à la place. En revanche, ces transformations vérifient deux lois, appelées lois de conservation ou loi de Soddy :

1^{ère} loi : Le nombre de charge Z est conservé lors d'une réaction nucléaire.

2^{ème} loi : Le nombre de masse A se conserve lors d'une réaction nucléaire.

□ Dans le cas d'une réaction nucléaire spontanée on a :

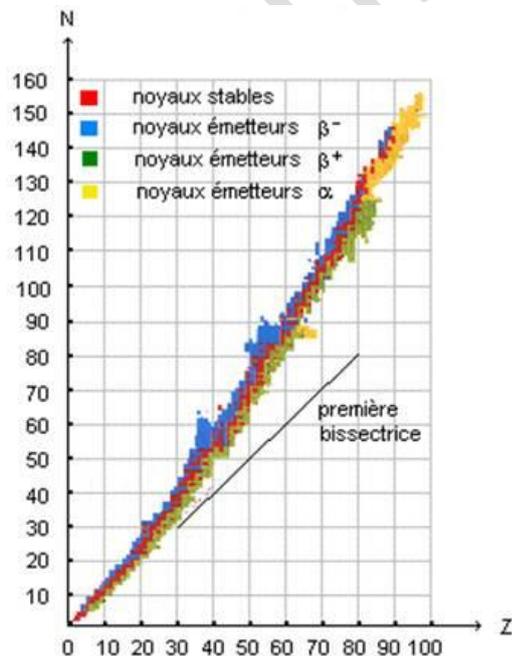


où X est appelé noyau père, Y est appelé noyau fils, et P une particule émise (électron, positon, particule α , etc).

Les lois de conservation imposent ici :

$$A = A_1 + A_2$$

$$Z = Z_1 + Z_2$$



4. Les différents types de radioactivité

□ Les noyaux radioactifs sont instables à cause d'un excès de protons (par rapport aux neutrons), ou d'un excès de neutrons (par rapport aux protons), ou d'un trop grand nombre de nucléons.

Document Hors programme :

□ On peut classer tous les noyaux connus dans un graphique (appelé diagramme de Segré) qui représente le nombre de neutrons N en fonction du nombre de protons Z. On distingue 4 zones :

- Une zone centrale appelé *vallée de stabilité* est constituée par les noyaux stables.

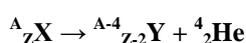
- Une zone au-dessus de la vallée de stabilité est constituée par des noyaux présentant un excès de neutrons. Ils donneront lieu à la radioactivité de type β^- .
- Une zone en-dessous de la vallée de stabilité est constituée par des noyaux présentant un excès de protons. Ils donneront lieu à la radioactivité de type β^+ .
- Une zone au-delà de la vallée de stabilité pour des N et Z très grand, correspondant à des noyaux lourds. Ils donneront lieu à la radioactivité de type α .

a) La radioactivité α

□ La radioactivité α concerne les noyaux émettant lors d'une désintégration une particule α , qui correspond à un noyau d'hélium 4 : ${}^4_2\text{He}$ (2 protons et 2 neutrons). Le noyau d'hélium porte deux charges positives, mais elles ne sont pas représentées.

La radioactivité α ne concerne que les noyaux lourds, qui sont trop chargés en nucléons.

□ L'équation générale de la radioactivité α s'écrit :



Exemples :

L'uranium 238 est radioactif α : ${}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\text{Th} + {}^4_2\text{He}$ où le thorium est le noyau fils.

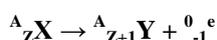
Le radon 222 est radioactif α : ${}^{222}_{86}\text{Rn} \rightarrow {}^{218}_{82}\text{Po} + {}^4_2\text{He}$ où le polonium est le noyau fils.

b) La radioactivité β

i) La radioactivité β^-

□ La radioactivité β^- concerne les noyaux émettant lors d'une désintégration un électron ${}^0_{-1}\text{e}$. La radioactivité β^- concerne les noyaux ayant un excès de neutrons par rapport aux protons.

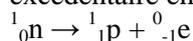
□ L'équation générale de la radioactivité β^- s'écrit :



Exemple :

Le cobalt 60 est radioactif β^- : ${}^{60}_{27}\text{Co} \rightarrow {}^{60}_{28}\text{Ni} + {}^0_{-1}\text{e}$ où le nickel est le noyau fils.

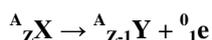
Rq : il n'y a pas d'électrons dans le noyau, mais il peut en émettre en transformant un neutron excédentaire en un proton :



ii) La radioactivité β^+

□ La radioactivité β^+ concerne les noyaux émettant lors d'une désintégration un positron (ou positon) ${}^0_{+1}\text{e}$. La radioactivité β^+ concerne les noyaux ayant un excès de protons par rapport aux neutrons.

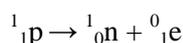
□ L'équation générale de la radioactivité β^+ s'écrit :



Exemple :

Le phosphore 30 est radioactif β^+ : ${}^{30}_{15}\text{P} \rightarrow {}^{30}_{14}\text{Si} + {}^0_{+1}\text{e}$ où le silicium est le noyau fils.

Rq : Cette radioactivité ne concerne que les noyaux artificiels, qui possèdent trop de protons. Un proton se transforme en neutron et émet un positon :



III. Réactions nucléaires provoquées : la fission et la fusion

□ Les lois de conservations énoncées plus haut sont également valables pour les réactions nucléaires provoquées. Les lois de Soddy sur la conservation du nombre de masse et du nombre de charge s'appliquent dans tous les cas de réactions nucléaires.

1. Equivalence masse-énergie

□ En 1905, lorsqu'il formule la théorie de la relativité restreinte, Einstein énonce la célèbre relation d'équivalence entre la masse et l'énergie :

Un système de masse m , au repos, possède une énergie E , dite énergie de masse, telle que :

où E est en joules (J)

$$E = m.c^2 \text{ m est en kg}$$

$$c = 3,0.10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

Rq : donc à une variation de masse correspond à une variation d'énergie ΔE ($\Delta E = \Delta m.c^2$) :

- Si $\Delta m < 0$, alors $\Delta E < 0$, le système libère de l'énergie car sa masse diminue (son énergie de masse diminue aussi).

- Si $\Delta m > 0$, alors $\Delta E > 0$, le système reçoit de l'énergie car sa masse augmente (son énergie de masse augmente aussi).

Rq : Les énergies mises en jeux sont souvent très petites, on utilise souvent l'électronvolt (eV), ou ses multiples (keV, MeV, GeV). On rappelle que $1\text{eV} = 1,6.10^{-19} \text{ J}$.

□ Expérimentalement, on a constaté que la formation d'un noyau, à partir de nucléons non liés s'accompagne d'une perte de masse, également appelé défaut de masse.

□ De manière conventionnelle, on préfère travailler avec des valeurs positives. On prendra donc pour le défaut de masse : $\Delta m = |m_{\text{finale}} - m_{\text{initiale}}| > 0$

Exemple : Formation du noyau d'hélium :

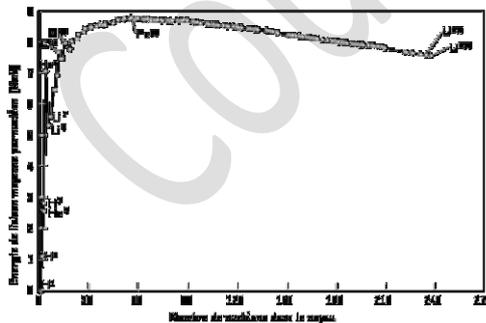
$$m_{\text{protons}} = 1,67265.10^{-27} \text{ kg}, m_{\text{neutrons}} = 1,67496.10^{-27} \text{ kg}, \text{ et } m(^4_2\text{He}) = 6,6447.10^{-27} \text{ kg};$$

$$\text{On calcule le défaut de masse : } \Delta m = |Z.m_{\text{protons}} + (A-Z).m_{\text{neutrons}} - m(^4_2\text{He})| = 5,05.10^{-29} \text{ kg}$$

2. Energie de liaison du noyau et énergie libérée

□ Lors d'une réaction nucléaire, l'énergie libérée (en joules) est : $E_{\text{libérée}} = |\Delta m|.c^2$

où Δm est la variation de masse totale des noyaux et des particules, en kg.



Rq : Hors Programme

□ La courbe d'Aston (ci-contre) représente l'énergie de liaison par nucléon en fonction du nombre de nucléons. Cette énergie de liaison par nucléon caractérise la cohésion du noyau. Plus cette énergie est élevée, plus le noyau est stable.

□ Cette courbe permet de prédire le comportement des noyaux lors de réactions nucléaires provoquées : les noyaux lourds peuvent se casser en deux noyaux plus

légers, qui auront une plus grande énergie de liaison par nucléons. C'est la fission nucléaire.

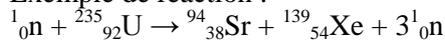
Certains noyaux légers peuvent fusionner pour former un seul noyau plus gros et plus stable. C'est la fusion.

3. La fission nucléaire

□ La fission est une réaction nucléaire au cours de laquelle un noyau lourd donne naissance à deux noyaux plus légers.

Elle est généralement amorcée avec un neutron qui sert de projectile, et produit en plus des noyaux fils un ou plusieurs neutrons, qui peuvent provoquer la fission d'autres noyaux. Si le nombre de neutrons émis lors de chaque fission est supérieur à 1, alors une réaction en chaîne peut se produire et devenir rapidement incontrôlable (principe de la bombe A).

Exemple de réaction :



Rq : on voit bien que le nombre de charge Z et le nombre de masse A se conservent lors d'une fission.

□ Les centrales nucléaires ont des dispositifs qui permettent de contrôler le nombre de neutrons émis, et donc la quantité d'énergie libérée par les réactions de fission. Pour amorcer la fission, il faut quand même apporter une quantité minimale d'énergie initiale.

Bilan énergétique pour l'exemple ci-dessus :

$$m_{\text{neutron}} = 1,67496 \cdot 10^{-27} \text{ kg}, m({}^{235}_{92}\text{U}) = 3,92439 \cdot 10^{-25} \text{ kg}, m({}^{94}_{38}\text{Sr}) = 1,56804 \cdot 10^{-25} \text{ kg}, m({}^{139}_{54}\text{Xe}) = 2,3281 \cdot 10^{-25} \text{ kg}$$

$$\text{On calcule le défaut de masse : } |\Delta m| = |m({}^{94}_{38}\text{Sr}) + m({}^{139}_{54}\text{Xe}) + 3 m_{\text{neutron}} - m({}^{235}_{92}\text{U}) - m_{\text{neutron}}| = 5,2492 \cdot 10^{-28} \text{ kg}$$

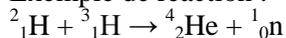
$$\text{On en déduit l'énergie libérée } E_{\text{libérée}} = 4,72428 \cdot 10^{-11} \text{ J} = 295 \text{ MeV}$$

Rq : 1kg d'uranium fournit environ autant d'énergie que 2 000 t de pétrole

4. la fusion nucléaire

□ La fusion est une réaction nucléaire au cours de laquelle deux noyaux légers s'assemblent pour former un seul noyau plus lourd. Il faut des températures et des pressions très élevées pour qu'elle puisse se produire. Naturellement, on ne trouve ces conditions qu'au cœur des étoiles.

Exemple de réaction :



Rq : on voit bien que le nombre de charge Z et le nombre de masse A se conservent lors d'une fusion.

□ L'énergie libérée par une fusion est très importante. Dans la bombe thermonucléaire (bombe H), l'énergie libérée n'est pas contrôlée. C'est un des défis du XXI^e siècle que de maîtriser la fusion nucléaire au cœur des centrales pour produire de l'électricité.

Bilan énergétique pour l'exemple ci-dessus :

$$m_{\text{neutron}} = 1,67496 \cdot 10^{-27} \text{ kg}, m({}^2_1\text{H}) = 3,34359 \cdot 10^{-27} \text{ kg}, m({}^3_1\text{H}) = 5,00736 \cdot 10^{-27} \text{ kg}, m({}^4_2\text{He}) = 6,64466 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\text{On calcule le défaut de masse : } |\Delta m| = |m({}^4_2\text{He}) + m_{\text{neutron}} - m({}^2_1\text{H}) - m({}^3_1\text{H})| = 3,133 \cdot 10^{-29} \text{ kg}$$

$$\text{On en déduit l'énergie libérée lors d'une fusion } E_{\text{libérée}} = 2,8197 \cdot 10^{-12} \text{ J} = 17,6 \text{ MeV}$$

Rq : Par nucléon, la fusion libère plus d'énergie que la fission.

IV. Applications

Recherche documentaire sur un des sujets ci-dessous :

Les réacteurs à eau pressurisée

Les projets ITER et HIPER

Les réacteurs à neutrons rapides

Les techniques d'imagerie médicale

Le retraitement des déchets nucléaires

Les accidents nucléaires

La stérilisation des aliments par irradiation

Les moteurs atomiques

L'analyse par activation neutronique

La datation au carbone 14

Les radiothérapies

Les armes nucléaires