

Fusion – fission

Niveau : L3

Prérequis : interactions gravitationnelle et électromagnétique, relativité restreinte (énergie de masse), effet tunnel

Introduction

La physique nucléaire a toujours eu un impact important sur notre société que ce soit dans les domaines de la médecine, militaire ou bien sûr de la production d'énergie électrique (en France en 2019, 70% de l'énergie électrique a été produite par des centrales nucléaires). Au cours de cette leçon, nous allons introduire les notions de base de la physique nucléaire afin d'étudier deux processus de production d'énergie qui sont : la fission et la fusion.

I Éléments de la physique nucléaire

1) Le noyau

A_ZX , X est le noyau, Z est le nombre de protons (et d'électrons), A est le nombre de nucléons ($N = A - Z$ est le nombre de neutrons).

Rappels : interactions

- **Interaction gravitationnelle** : interaction attractive entre deux corps possédant une masse (négligeable en physique atomique devant les autres interactions)
- **Interaction électromagnétique** : interaction attractive ou répulsive entre deux corps possédant une charge électrique

L'interaction gravitationnelle est négligeable devant l'interaction électromagnétique car le rapport des forces gravitationnelle et électromagnétique est d'environ 10^{-37} pour un noyau. S'il n'y avait que ces deux interactions, le noyau serait instable car il y aurait répulsion entre les protons au sein du noyau.

Interaction forte : interaction attractive, indépendante de la charge, de très courte portée (10^{-15} m environ) et très intense (100 fois plus importante que l'interaction électromagnétique).

Mais ce n'est pas encore suffisant pour expliquer la stabilité du noyau car cela voudrait dire qu'avec ces trois interactions, des noyaux composés seulement de neutrons seraient très stables : or cela n'existe pas → il existe donc une autre interaction :

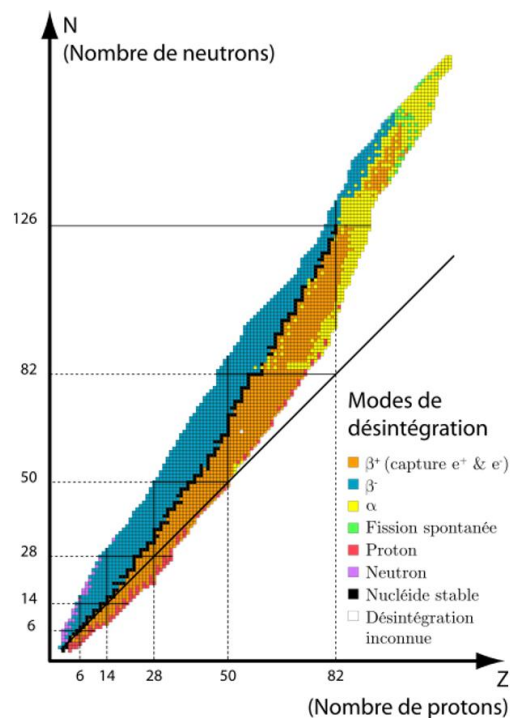
Interaction faible : intervient sur le nombre de protons et de neutrons dans un noyau stable, de très courte portée (environ 10^{-15} m) et peu intense (1000 fois plus faible que l'interaction électromagnétique).

Stabilité : un noyau est dit stable s'il ne se désintègre pas spontanément.

C'est la compétition entre les différentes interactions qui va permettre d'obtenir un noyau stable (seulement 266 noyaux stables sur environ 3135 noyaux connus).

Diagramme N-Z

266 noyaux stables
sur plus de 3000
noyaux connus



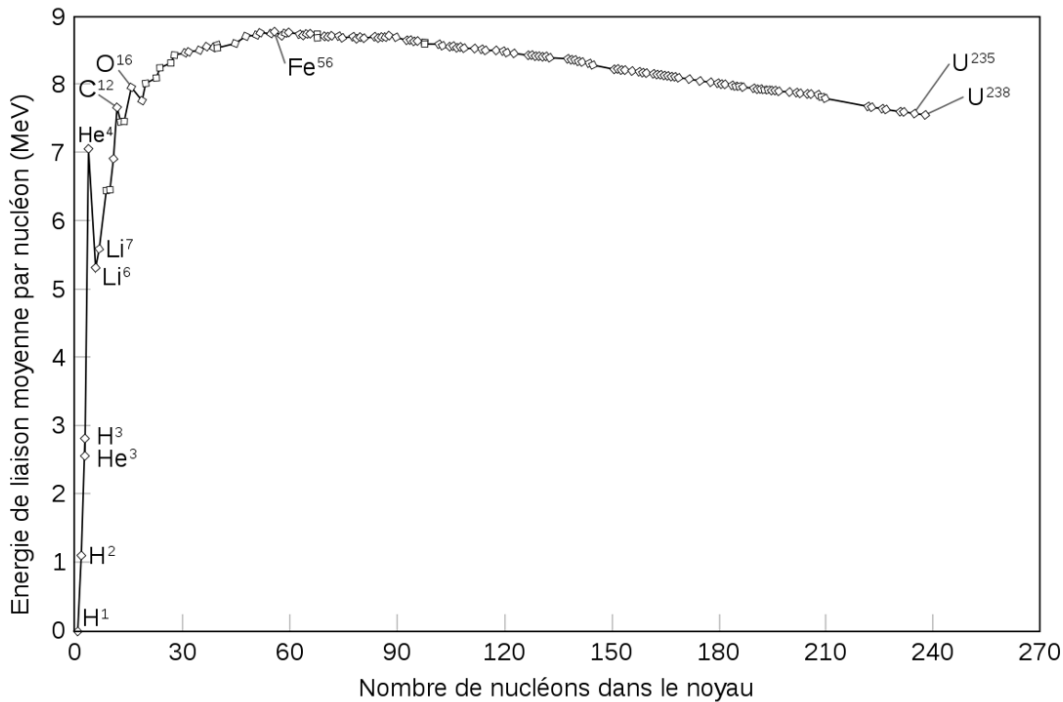
Énergie de liaison : $B\left(\frac{A}{Z}X\right) = Zm_p c^2 + Nm_n c^2 - m\left(\frac{A}{Z}X\right) c^2 > 0$, avec $m\left(\frac{A}{Z}X\right) = Zm_p + Nm_n - \Delta m$

Δm est le défaut de masse (> 0)

Cette énergie correspond à l'énergie à fournir pour passer du noyau à un système de nucléons libres.

On peut voir l'évolution de cette énergie de liaison par nucléon en fonction du nombre de nucléons grâce à la courbe d'Aston :

Courbe d'Aston



On va maintenant essayer de se donner un modèle pour évaluer l'énergie de liaison pour chaque noyau.

2) Modèle de la goutte liquide

Le modèle de la goutte liquide est un modèle nucléaire simple où l'on considère le noyau comme une goutte liquide, c'est-à-dire que l'on considère que le noyau est une sphère homogène au sein de laquelle les particules interagissent très fortement entre elles.

Ce modèle nous permet d'obtenir la formule semi-empirique suivante :

$B\left(\frac{A}{Z}X\right) = a_v A - a_s A^{\frac{2}{3}} - a_c \frac{Z(Z-1)}{A^{\frac{1}{3}}} - a_a \frac{(N-Z)^2}{A} + \delta(A)$, avec a_v le terme de volume, a_s le terme de surface, a_a le terme asymétrique et $\delta(A)$ l'appariement.

Le terme semi-empirique signifie que les dépendances de chaque terme en A, Z et N ont été obtenus théoriquement mais que les constantes ont été obtenus expérimentalement.

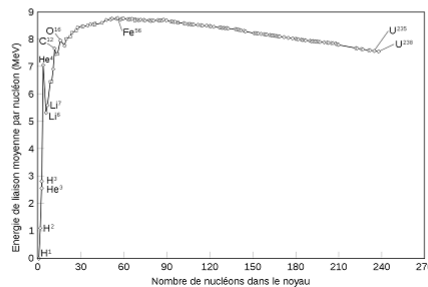
Explication des différents termes :

- Volume : en première approximation avec la courbe d'Aston on peut dire que l'énergie de liaison moyenne par nucléon B/A est une constante donc B est proportionnelle à A
- Surface : les nucléons à la surface du noyau ont moins de voisins que ceux à l'intérieur du noyau donc on retranche un terme proportionnel à la surface (rayon R proportionnelle à $A^{1/3}$) : analogie avec la tension de surface
- Coulombien : prise en compte de la répulsion des Z protons due à l'interaction électromagnétique (d'où le terme proportionnel à $\frac{Z(Z-1)}{A^{\frac{1}{3}}}$)

- Asymétrique : terme qui tend à égaliser le nombre de protons et de neutrons pour les noyaux légers ($Z < 30$)
- Appariement : terme qui favorise l'appariement des fermions deux à deux pour former des paires : $\delta(A) = a_p A^{-\frac{3}{4}}$ pour Z et N pairs, $\delta(A) = 0$ pour Z ou N impair et $\delta(A) = -a_p A^{-\frac{3}{4}}$ pour Z et N impairs.

Formule de Bethe Weizsäcker

- Rayon d'un noyau : $R = R_0 A^{1/3}$
- Terme de volume : $a_v A$



Formule de Bethe Weizsäcker

- Rayon d'un noyau : $R = R_0 A^{1/3}$
- Terme de surface : $-a_s A^{2/3}$
analogue à la notion de tension de surface
- Terme coulombien : $-a_c Z(Z-1)/ A^{1/3}$
provient de la force de répulsion des protons

Formule de Bethe Weizsäcker

- Terme d'asymétrie : $-a_a (N-Z)^2 / A$
tend à égaliser le nombre de protons et de neutrons pour les noyaux légers ($Z < 30$)
- Terme d'appariement : terme qui favorise l'appariement des nucléons deux à deux pour former des paires

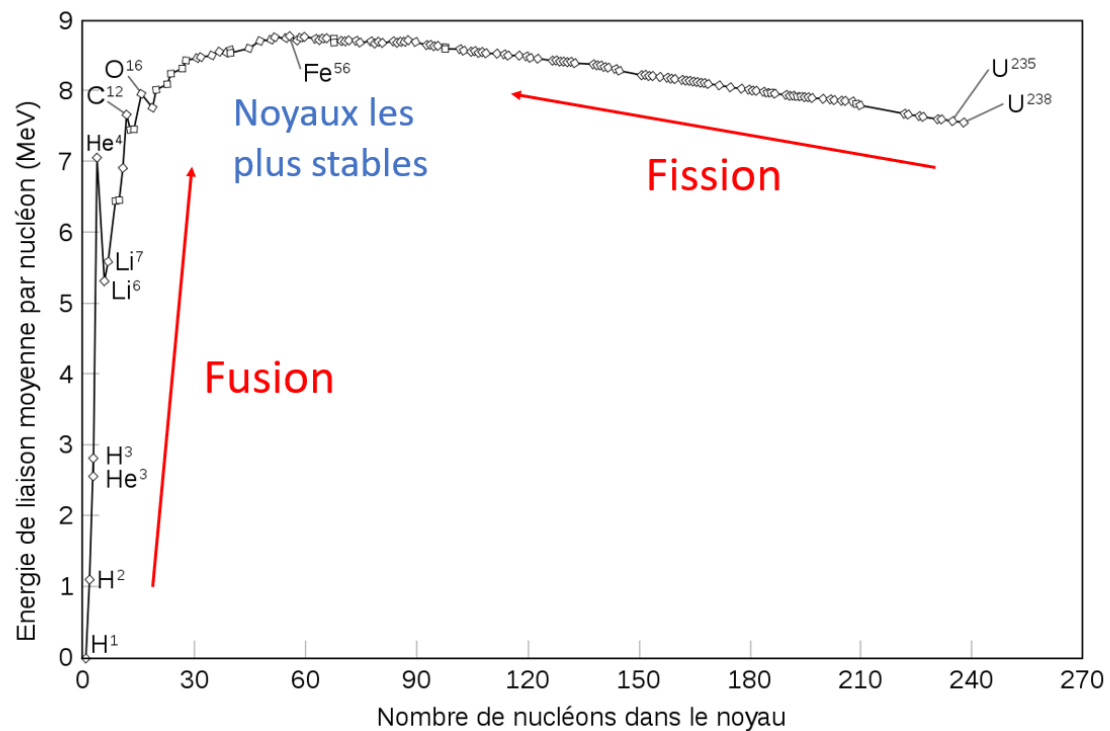
$$\delta(A) = \begin{cases} a_p A^{-3/4} & \text{pour Z et N pairs} \\ 0 & \text{pour Z ou N impair} \\ -a_p A^{-3/4} & \text{pour Z et N impairs} \end{cases}$$

Ce modèle est plutôt bon car il donne un comportement et des valeurs de B très proches de la courbe expérimentale d'Aston.

On peut observer sur la courbe d'Aston deux zones distinctes :

- Pour $A < 56$: si A augmente, l'énergie de liaison par nucléon augmente aussi (noyau plus stable), cela correspond au processus de fusion
- Pour $A > 56$: si A diminue, l'énergie de liaison par nucléon augmente (noyau plus stable), cela correspond au processus de fission

Courbe d'Aston



On va se focaliser dans un premier temps sur la fission.

II Fission

1) Présentation générale

Réaction de fission : ${}^A_ZX \rightarrow {}^{A_1}_{Z_1}X_1 + {}^{A_2}_{Z_2}X_2 + bn + Q$, avec b le nombre de neutrons échangés et Q l'énergie de fission libérée au cours de la réaction : $Q = B({}^{A_1}_{Z_1}X_1) + B({}^{A_2}_{Z_2}X_2) + B(bn) - B({}^A_ZX)$

Ordre de grandeur : Q vaut environ 200 MeV pour une réaction chimique

Il existe 2 types de fissions :

Deux types de fissions

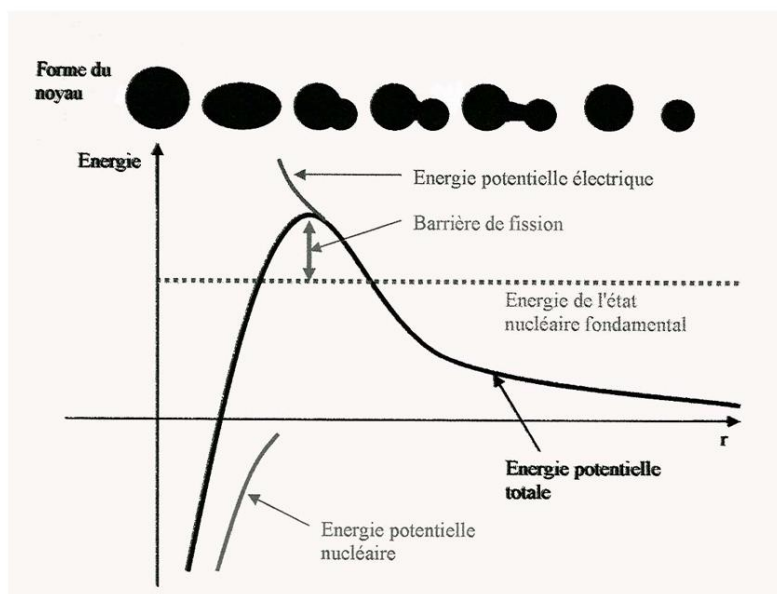
- **Fission spontanée** : désintégration de noyau père sans absorption préalable d'un corpuscule, possible seulement avec des noyaux lourds comme : ^{235}U (processus radioactif de très grande période)
- **Fission induite** : noyau lourd capture une autre particule (généralement un neutron) et se désintègre en plusieurs fragments

On va étudier la fission induite un petit plus en détail.

2) Fission induite

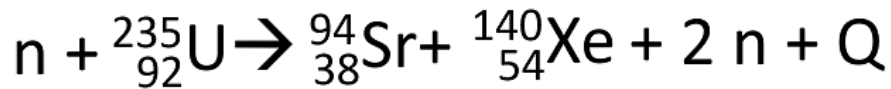
Energie d'activation E_a : énergie nécessaire pour franchir la barrière de potentiel de fission et que la réaction de fission induite ait lieu

Energie d'activation de la fission induite



Cette énergie est souvent apportée au noyau par un neutron (ou un photon) et comme la réaction de fission produit des neutrons, cela permet d'entretenir la réaction : réaction en chaîne.

Fission induite : exemple



Production de neutrons qui peuvent être utilisés pour entretenir la réaction de fission : **réaction en chaîne**

Remarque : il est possible de passer la barrière de potentiel par effet tunnel : fission spontanée

Exemple de bilan énergétique de capture d'un neutron :

Le système étudié est composé d'un neutron, qui va apporter l'énergie nécessaire pour activer la réaction, et du noyau.

- Le système avant la réaction est composé d'un neutron à grande distance du noyau avec une certaine énergie cinétique $E_{c,n}$ (en mouvement vers le noyau) et du noyau immobile :
 $E_{\text{tot}} = m({}^A_ZX)c^2 + m_n c^2 + E_{c,n} = (A+1-Z)m_n c^2 + Zm_p c^2 - B({}^{A+1}_ZX) + E_{c,n}$
- Energie de l'état fondamental du noyau avec un neutron supplémentaire est :
 $E_0({}^{A+1}_ZX) = (A+1-Z)m_n c^2 + Zm_p c^2 - B({}^{A+1}_ZX)$
- Donc l'énergie apportée par le neutron lors de la capture de celui-ci est :
 $\Delta E = E_{\text{tot}} - E_0({}^{A+1}_ZX) = B({}^{A+1}_ZX) - B({}^A_ZX) + E_{c,n}$

Or pour que la fission ait bien lieu, il faut que $\Delta E \geq E_a$ donc : $E_{c,n} \geq E_a - B({}^{A+1}_ZX) + B({}^A_ZX)$

Application numérique : pour l'uranium 235 $B = 7,591$ MeV, pour l'uranium 236 $B = 7,586$ MeV, E_a vaut environ 5 MeV donc $E_{c,n}$ vaut environ 5 MeV.

Une application concrète qui utilise des réactions de fission induite pour produire de l'énergie est le réacteur nucléaire.

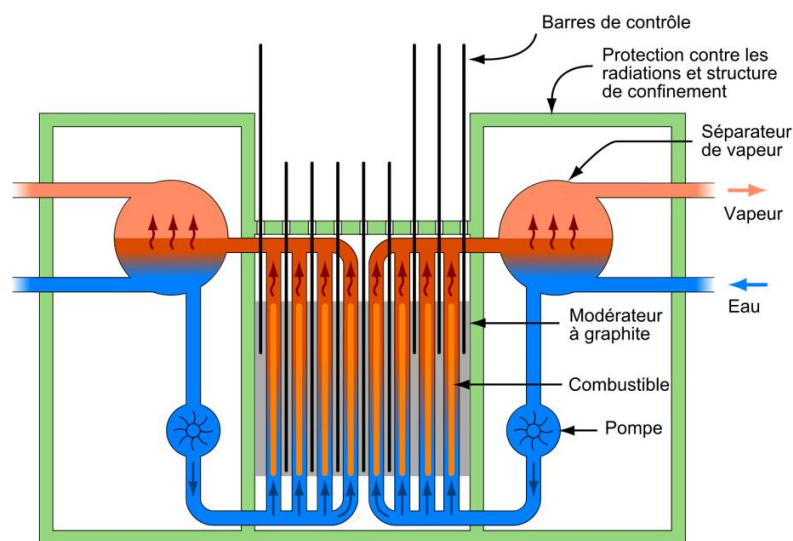
3) Fission spontanée

Un réacteur nucléaire est composé de différents composants :

Composants du cœur d'un réacteur nucléaire

- **Combustible** : noyau père de la réaction de fission
- **Barres de contrôle** : absorbent les neutrons pour ralentir fortement la réaction en cas de besoin (amovibles)
- **Caloporteur** : récupère l'énergie de la réaction sous forme de chaleur et la transporte hors du cœur
- **Modérateur** : ralentit la vitesse des neutrons pour éviter que le réacteur s'emballe

Schéma d'un réacteur à eau pressurisée (REP)



Ordre de grandeur : la fission d'une tonne d'uranium équivaut à la combustion de 15 000 tonnes de pétrole.

Comme on le sait, les réacteurs nucléaires comportent de gros risques et c'est pour cela que la recherche se tourne vers d'autres types de réaction qui pourraient produire autant d'énergie (voire plus) mais avec moins de risques : c'est le cas de la fusion.

III Fusion

1) Présentation générale

Réaction de fusion : ${}_{Z_1}^{A_1}X_1 + {}_{Z_2}^{A_2}X_2 \rightarrow {}_Z^AX + \gamma + Q$, γ : fragments tels que des neutrons ou des protons et $Q = B({}_Z^AX) + B(\gamma) - B({}_{Z_1}^{A_1}X_1) - B({}_{Z_2}^{A_2}X_2) > 0$ est l'énergie de fusion libérée au cours de la réaction.

Remarque : l'énergie libérée par neutron est environ 4 fois plus élevée pour la fusion que la fission

Difficultés de la fusion : la répulsion coulombienne s'oppose à la fusion car les deux noyaux sont chargés positivement. Il faut donc confiner les deux noyaux pendant un temps suffisamment long et à une température suffisamment élevée ($T > 100$ millions de degrés) : on appelle cela des modes de confinement. Il en existe différents types :

Modes de confinement

- **Confinement gravitationnel** : celui qui est exercé dans les étoiles
- **Confinement magnétique** : utilisation de champs magnétiques afin de confiner le plasma de particules (le plus étudié à l'heure actuelle)
- **Confinement inertiel** : utilisation de lasers grandes puissances

Les applications les plus connues de la fusion sont les réactions nucléaires dans les étoiles.

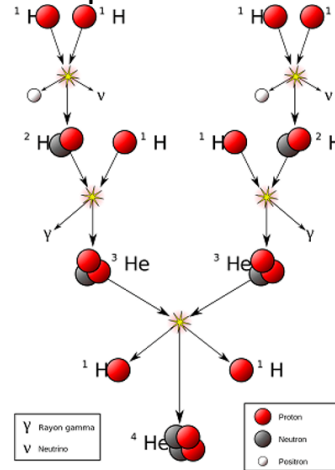
2) Réactions nucléaires dans les étoiles

Modèle le plus simple de formation des étoiles :

- Formation à partir d'un amas d'hydrogène, sous l'effet de la gravitation : la densité et la température du gaz stellaire augmentent lentement jusqu'à ce qu'il devienne opaque à son propre rayonnement IR.
- Ensuite la température augmente plus rapidement jusqu'à environ 10^5 K, où l'énergie thermique suffit pour ioniser les atomes d'hydrogène (création d'un plasma d'ions et d'électrons).
- Enfin, la température augmente jusqu'à $15 \cdot 10^6$ K où la fusion commence à intervenir de manière notable avec la formation de deutérium puis d' ${}^3_2\text{He}$ et d' ${}^4_2\text{He}$ (fin du premier cycle) tout en libérant de l'énergie sous forme de rayonnement

Réactions nucléaires dans les étoiles

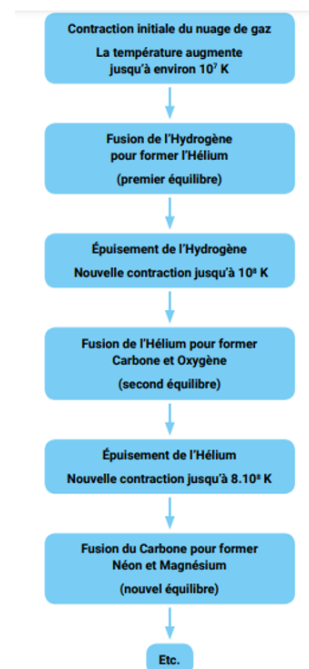
- Formation d'une étoile à partir d'un amas d'hydrogène qui, sous l'effet de la gravitation, va s'effondrer sur lui-même (augmentation de la densité et de la température : confinement gravitationnel)
- A partir de $T=1,5 \cdot 10^7$ K, début de la fusion dans l'étoile :



Remarque : le Soleil en est actuellement à la formation d' ${}^4_2\text{He}$.

Réactions nucléaires dans les étoiles

- Plus la masse d'une étoile est élevée et plus elle pourra créer des noyaux « lourds » (le Soleil ne pourra fusionner que jusqu'à l'oxygène)



Conclusion

Dans cette leçon, nous avons vu deux processus de production d'énergie en physique nucléaire. En comparant les deux, on se rend compte que la fusion produit plus d'énergie par nucléon que la fission, c'est une énergie plus « propre » car elle ne produit pas de déchets nucléaires, les combustibles de la fusion sont universellement disponibles, et surtout le risque d'accidents est beaucoup plus faible car

on peut arrêter la réaction instantanément ce qui n'est pas le cas d'un réacteur à fission. D'où le projet international ITER qui a pour but de montrer la viabilité d'un réacteur à fusion et donc de remplacer à long terme les centrales nucléaires basées sur la fission par des réacteurs à fusion.

Bibliographie

-Physique nucléaire appliquée, Frédéric Mayet, De Boeck

-Énergie nucléaire : Fission et fusion, Pierre Charles, ellipses

Questions

- Quelle expérience a mis en évidence l'existence du noyau ?
→ L'expérience de Rutherford qui consiste à envoyer des particules α sur une fine feuille d'or, et on observe des particules qui sont « réfléchies ».
- Différents types de désintégration ?
→ Désintégration α : émission d'un He4 , désintégration β^+ : ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + e^+ + \nu_e$, désintégration β^- : ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + e^- + \bar{\nu}_e$, capture électronique : ${}^A_Z X + e^- \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + \nu_e$
- Autre nom du diagramme N-Z ?
→ Diagramme de Segré
- Origine du nom du modèle de la goutte liquide et valeurs des coefficients ?
→ Vient de l'analogie avec la tension de surface pour des gouttes de liquide, les coefficients sont calculés expérimentalement
- Qu'est-ce que les nombres magiques ?
→ Nombres particuliers de neutrons ou de protons pour lesquels le noyau est particulièrement stable, ils peuvent être obtenus avec le modèle en couche.
- Origine formule R ?
→ Le volume est proportionnel à A et à R^3 (on assimile le noyau à une sphère de rayon R)
- Comment conférer une énergie cinétique aux neutrons ?
→ On peut accélérer des protons avec un champ électrique et les collisionner avec des neutrons pour leur transférer une énergie cinétique.
- Pourquoi une étoile qui se contracte se réchauffe ?
→ On peut le montrer avec le théorème du Viriel : $2E_c + E_p = 0$
- Les ordres de grandeur de l'énergie de masse des électrons, protons et neutrons ?
→ électron : 511 keV, neutron : 939 MeV, proton : 938 MeV
- Différences entre interaction forte/faible et EM ? Plus particulièrement entre gluon et photon ?
→ Il n'y a qu'un seul type de photons alors qu'il y a plusieurs gluons.
- Quel est le potentiel associé à l'interaction forte ?
→ Potentiel de Yukawa
- Pourquoi est-ce que les noyaux lourds possèdent plus de neutrons que de protons pour être stables ?
→ Car localement l'interaction forte doit compenser l'interaction EM, or avec des noyaux plus lourds, le rayon est plus grand et l'interaction forte est de très courte portée donc il faut plus de neutrons pour compenser le fait que l'interaction forte est plus faible au « bord » du noyau.

- D'où vient le $(Z-1)$ dans le terme coulombien de la formule de Bethe-Weizsäcker ?
➔ Cela vient du fait que s'il n'y a qu'un seul proton, il n'y a pas de répulsion.
- Comment se fait l'appariement des électrons ?
➔ Formation de couples de spins
- Où sont produits les noyaux lourds ?
➔ Nucléosynthèse de supernova
- Quel est le principe de confinement magnétique ?
➔ On place les particules (plasma) dans un champ magnétique avec une géométrie particulière (sorte d'anneau) qu'on appelle tokamak