

LP42 – FUSION, FISSION

30 mars 2017

Camille Eloy & David Dumont

L'excès de sommeil fatigue.
HOMÈRE, *L'Odyssée*

Niveau : L3

Bibliographie

- *Énergie nucléaire*, **Basdevant** → La bible pour la fission et la fusion
- *Physique nucléaire*, **C. Le Sech** → la bible pour le noyau atomique, moins calculatoire

Prérequis

- Modèle de l'atome,
- Nucléons, isotopes,
- Interaction forte/coulombienne,
- Effet tunnel

Table des matières

| | | |
|----------|---|----------|
| 1 | Le noyau atomique | 2 |
| 1.1 | Énergie de liaison et défaut de masse | 2 |
| 1.2 | Le modèle de la goutte liquide | 2 |
| 2 | La fission | 4 |
| 2.1 | Énergie et produits de fission | 4 |
| 2.2 | Barrière de fission | 5 |
| 2.3 | Application aux réacteurs nucléaires | 6 |
| 3 | La fusion | 7 |
| 3.1 | Principe et énergie | 7 |
| 3.2 | Barrière coulombienne, énergie thermonucléaire. | 7 |
| 3.3 | Le critère de Lawson | 8 |
| 3.4 | Nucléosynthèse stellaire | 8 |

Introduction

Dans la nature, on observe des réactions de fission où un noyau lourd se divise en deux noyaux plus légers. On observe également des réactions de fusion où deux noyaux légers fusionnent pour produire un noyau plus lourd. ***Pourquoi observe-t-on ces deux phénomènes et comment fonctionnent-ils ?*** La stabilité d'un noyau atomique dépend de sa cohésion déterminée par son énergie de liaison. Les réactions nucléaires tendent toujours vers la production d'édifices de plus en plus stables.

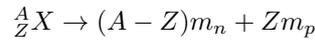
| *Commençons par bien comprendre la stabilité des noyaux atomiques*



Le noyau atomique

Énergie de liaison et défaut de masse

L'énergie de liaison est ce qui maintient en place les nucléons dans le noyau. C'est par définition, l'énergie à fournir pour séparer un noyau atomique A_ZX immobile en ses nucléons séparés et immobiles. La réaction est ainsi



Faisons un bilan de masse : comme tous les composés sont au repos, l'énergie de chacun correspond à son énergie de masse $E = mc^2$ donc

$$m_X c^2 + E_l(A, Z) = (A - Z) \times m_n c^2 + Z \times m_p c^2$$

Il en découle que

$$E_l(A, Z) = (A - Z) \times m_n c^2 + Z \times m_p c^2 - m_X c^2$$

Un noyau stable possède une énergie de liaison positive ($E_l > 0$) : l'énergie de masse de ses nucléons séparés est supérieure à l'énergie de masse du noyau. Il est préférable du point de vue énergétique pour les nucléons de s'assembler sous la forme d'un noyau.

Défaut de masse

On parle également de défaut de masse Δm défini tel que $E_l = \Delta m c^2$

OdG : énergie de liaison

↗ Le Sech p.20

| Atome | E_l (MeV) |
|------------------|-------------|
| 2_1H | 2.22 |
| ${}^{16}_8O$ | 127.6 |
| ${}^{238}_{92}U$ | 1801.2 |

Énergie de liaison du cortège électronique

↗ Le Sech p.22

Le même raisonnement est applicable aux électrons qui gravitent autour du noyau. Ainsi pour l' 2_1H on a $E_l(e) = 13.6\text{eV} \ll E_l$. De même pour l' ${}^{238}_{92}U$, $\frac{E_l(e)}{E_l} \sim 2.8 \cdot 10^{-4} \ll 1$. En pratique on peut donc négliger totalement l'énergie de liaison électronique.

L'énergie de liaison E_l augmente avec le nombre de nucléons A : il est donc difficile de comparer la stabilité de deux noyaux distincts. On utilise donc l'énergie de liaison par nucléons E_l/A . La courbe d'Aston, illustrée par la FIGURE 1, montre l'évolution de l'énergie de liaison par nucléons en fonction du nombre de nucléons.

En outre, on constate que les isotopes stables sont regroupés dans la vallée de la stabilité comme en atteste le diagramme de la FIGURE 2.

Le modèle de la goutte liquide

↗ Le Sech p.27

Hypothèses :

- le noyau est une goutte liquide de matière nucléaire, sphérique et incompressible,
- interaction forte de courte portée et indépendante de la nature du nucléon,
- la densité volumique de charge et de nucléons est homogène.

Energie de liaison par nucléon

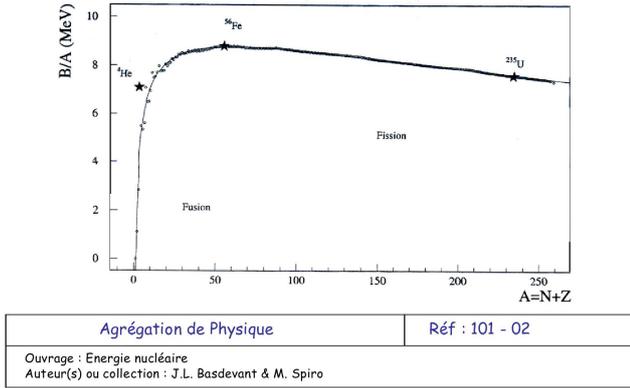
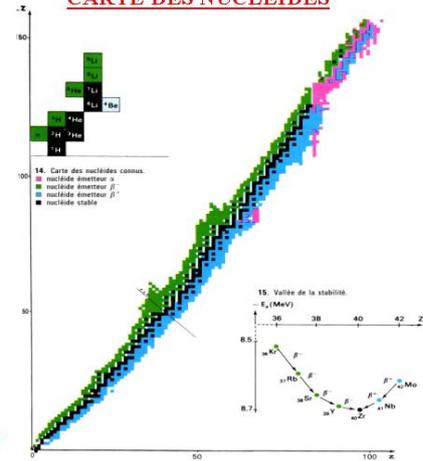


Fig. 1 Courbe d'Aston. Le Fer est le noyau le plus stable.
©Banqued'image

CARTE DES NUCLEIDES



PHYSIQUE TERMINALE C/E
HATIER
RBF 101.01

Fig. 2 Vallée de stabilité. Tous les isotopes sont regroupés.
©Banqued'image

Ce modèle vise à modéliser la masse d'un noyau en fonction du nombre de nucléons. L'analogie avec la goutte d'eau provient de la ressemblance entre l'interaction forte et l'interaction de Van der Waals à l'origine de la cohésion de la goutte. Cependant pour le noyau, il existe une force répulsive à longue portée : l'interaction électromagnétique, ici l'interaction électrostatique. Ce modèle conduit à la formule semi-empirique de Bethe-Weisacker pour l'énergie de liaison

$$E_l(A, Z) = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_a \frac{(A - 2Z)^2}{A} + \delta$$

Les coefficients a_v , a_s , a_c et a_a sont empiriques. Interprétons chaque terme :

- $a_v A$ est un terme de volume. Plus le noyau comporte de nucléons et plus l'énergie de liaison est importante. Chaque nucléons apporte une énergie constante à l'édifice,
- $-a_s A^{2/3}$ est un terme de tension superficielle qui tend à minimiser la surface de la goutte $S = 4\pi R^2 = 4\pi r_0^2 A^{2/3}$. Une autre vision est de considérer que les nucléons à la surface du noyau ont moins de voisins que ceux du centre : Le terme de volume surestime donc l'énergie de liaison globale. Le terme de surface apporte cette correction qui est négative,
- $-a_c \frac{Z^2}{A^{1/3}}$ est le terme de répulsion coulombienne entre les protons. Les Z protons du noyau se repoussent via la force coulombienne dont l'énergie associée varie en $\frac{1}{R} = \frac{1}{r_0 A^{1/3}}$. Ce terme réduit la cohésion du noyau et donc l'énergie de liaison d'où le signe,
- $-a_a \frac{(A-2Z)^2}{A}$ est le terme d'asymétrie et tend à approcher le nombre de neutrons ($A-Z$) du nombre de protons,
- δ est le terme d'appariement quantique : le noyau est plus stable quand les nucléons sont appariés deux-à-deux.

Aussi en notant le nombre de neutrons N et le nombre de protons Z on a $\delta \begin{cases} > 0 \text{ pour } N \text{ et } Z \text{ pairs} \\ < 0 \text{ pour } N \text{ et } Z \text{ impairs} \\ = 0 \text{ sinon} \end{cases}$

On constate expérimentalement que certains éléments dont le noyau possède un nombre particulier de protons ou de neutrons (un nombre dit magique) ont une énergie plus élevée que prévu par Bethe-Weisacker. Cela s'explique par le modèle en couche (analogue au modèle en couche pour les électrons) qui fait apparaître les nombres magiques correspondants au remplissage complet des couches. Ces niveaux sont illustrés par la FIGURE 3.

À présent, les paramètres influençant la stabilité d'un noyau sont mieux connus. Il nous est alors possible d'expliquer les réactions nucléaires de fission et de fusion. Commençons par la fission.

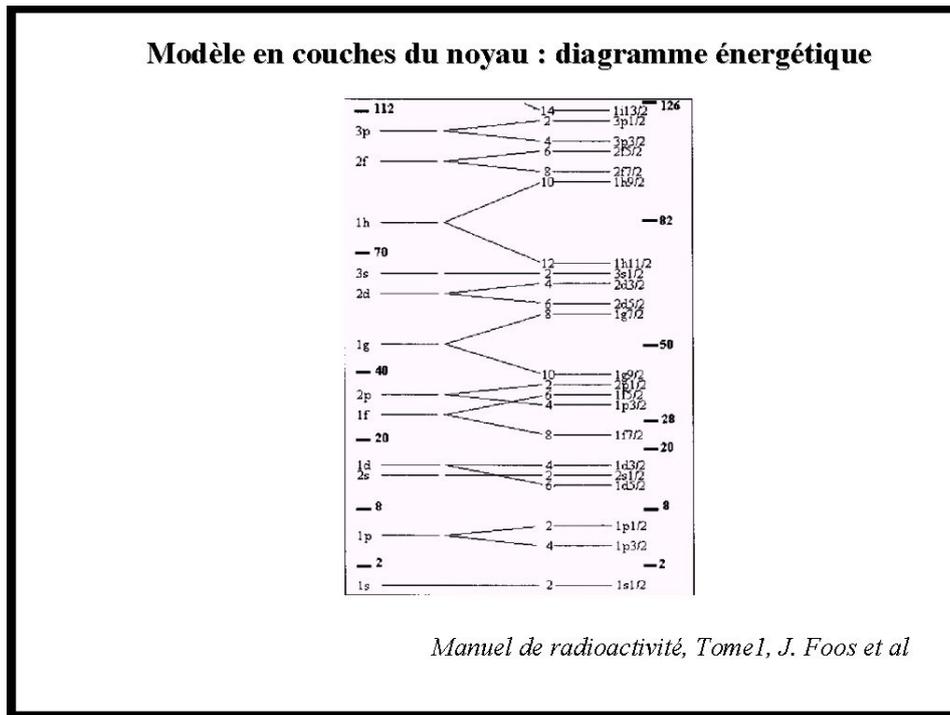


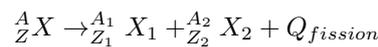
Fig. 3 Modèle en couche pour le noyau expliquant les nombres magiques. @Banqued'image



La fission

☛ Basdevant p.185

La fission d'un noyau consiste en sa brisure spontanée ou provoquée en plusieurs noyaux fils plus stables énergétiquement parlant, et comportant des nombres de nucléons plus faibles. Ainsi pour un noyau ${}^A_Z X$, on observe



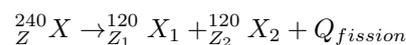
Cette réaction permet à un noyau lourd de donner naissance à deux noyaux plus stables. Ainsi, au cours de la réaction, une énergie dite *de fission* $Q_{fission}$ est libérée. Cette énergie est libérée sous forme d'énergie cinétique pour les produits. Dans nos centrales nucléaires, c'est cette énergie que l'on récupère avec un rendement de 33% environ. À noter que la fission d'un noyau n'est envisageable que pour les noyaux lourds, i.e ceux situés à droite du Fer dans le diagramme d'Aston.

Énergie et produits de fission

L'énergie de fission est très importante.

OdG : énergie libérée par une réaction de fission

On considère la réaction suivante



D'après la courbe d'Aston, $\frac{E_l(240)}{240} = 7.6\text{MeV}$ et $\frac{E_l(120)}{120} = 8.5\text{MeV}$ donc $Q_{fission} = 240 \times (8.5 - 7.6) = 220\text{MeV}$. En pratique, un certain nombre de neutrons sont produits (car l'excès de neutrons croît avec A). Comme leur énergie de liaison est nulle par définition, $Q_{fission} = 220\text{MeV} - \nu \times 8.5\text{MeV} = 200\text{MeV}$ indépendamment du noyau père.

Ainsi, une réaction de fission libère en moyenne 200MeV.

OdG : énergie libérée par la fission de 1g de ^{235}U

On a $E_{\text{libérée}} = \text{nombre de noyau de } ^{235}\text{U} \text{ dans } 1\text{g} \times 200\text{MeV}$ donc
 $E_{\text{libérée}} = \frac{1\text{g}N_A}{M(^{235}\text{U})} \times 200\text{MeV} \sim 81\text{GJ}$. Or la combustion de 1kg de pétrole libère 42MJ. Au final

$$1\text{g de } ^{235}\text{U} \iff 2\text{T de pétrole}$$

On voit tout l'intérêt de la fission...

Étudions la réaction de fission suivante :



⚠ Un même noyau fissile peut conduire à des produits finaux différents. Écrire une réaction de fission n'a presque pas de sens en soit et l'on préfère raisonner en terme statistique. La fission est essentiellement binaire. La distribution de probabilité reportée sur la FIGURE 4 est une courbe à 2 pics : les fragments ont des masses distinctes.

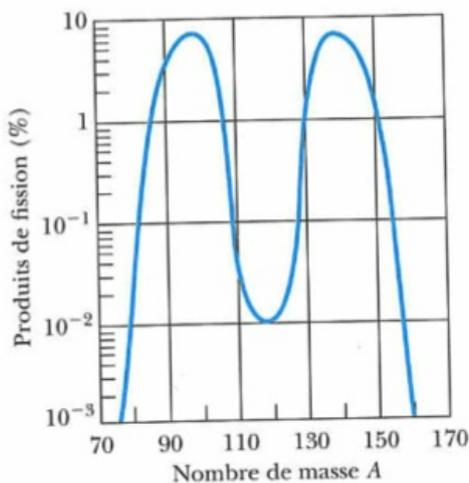


Figure 13.8 Distribution des pourcentages des fragments de fission produits par la fission de ^{238}U induite par des neutrons thermiques. On remarque que la fission asymétrique est beaucoup plus probable que la fission symétrique (masses égales). Tiré de R.D. Evans, *The Atomic Nucleus*, New York : McGraw-Hill (1955).

Tiré de : Physique Moderne, Thornton et Rex (p. 478)

Fig. 4 Distribution statistique des produits de fission. @Banqued'image

C'est la fission asymétrique ! Pour la fission de ^{235}U induite par des neutrons on observe :

- un fragment dans le groupe $A \sim 95$ (Br_{35} , Kr_{36} , Sr_{38} , Zr_{40})
- un fragment dans le groupe $A \sim 140$ (I_{53} , Xe_{54} , Ba_{56}).

Cette distribution est due aux nombres magiques évoqués précédemment. Les fragments du groupe $A \sim 95$ sont les isotones $^1 N = 50$ et les fragments du groupe $A \sim 140$ les isotones $N = 82$. Les fragments tendent à se rapprocher des nombres magiques afin d'être plus stables.

Barrière de fission

↪ Basdevant p.189

Soit la réaction de fission du ^{238}U



Reconsidérons le modèle de la goutte liquide pour le noyau de ^{238}U . Au cours de la réaction, la goutte se déforme vers une ellipsoïde. Cette déformation augmente l'énergie de tension superficielle et diminue l'énergie de répulsion coulombienne. Quand le rayon de la goutte varie entre R_0 le rayon initial de la goutte et l'infini (fragments séparés), l'énergie potentielle du système passe par un maximum.

1. les noyaux ayant un même nombre de neutrons mais un nombre de protons différent

Schéma de l'énergie potentielle

Il y a donc une barrière de potentielle appelée *barrière de fission*. On appelle énergie d'activation la barrière d'énergie associée. En pratique $E_A \sim 7\text{MeV}$. Il existe plusieurs types de fission :

- la fission spontanée : la barrière de potentielle est franchie par effet tunnel. Cependant, vu les masses en jeu, la probabilité de franchissement est très faible. C'est pourquoi pour ^{235}U la fission spontanée est minoritaire devant la désintégration α .
- la fission induite par neutron : le noyau lourd absorbe un neutron dont l'énergie cinétique lui permet de franchir la barrière d'activation.

Par ailleurs, on distingue

- les noyaux fissibles qui fissionnent directement. ex : $^{235}\text{U} + n \rightarrow ^{236}\text{U}^* \rightarrow \dots$,
- des noyaux fertiles qui par désintégrations radioactives donnent naissance à des noyaux fissibles. ex : $^{238}\text{U} + n \rightarrow (\beta^-)^{239}\text{Np} \rightarrow (\beta^-)^{239}\text{Pu} \rightarrow \dots$

Application aux réacteurs nucléaires

➤ Le Sech Ch.10

Il s'agit d'utiliser à profit l'énergie libérée par la fission. Des noyaux suffisamment instables doivent être utilisés afin de ne pas se désintégrer par émission α trop rapidement. L'industrie nucléaire utilise de ^{235}U qui est capable d'absorber les neutrons dits *thermiques* qui ont une vitesse liée à l'agitation thermique du milieu de l'ordre de 2km/s. Les neutrons émis lors de la fission sont dits *rapides* et ont une vitesse de l'ordre de 20 000km/s. Une fois qu'un neutron thermique est absorbé, ^{235}U (devenu $^{236}\text{U}^*$ fissionne en émettant 2.4 neutrons en moyenne. Ces derniers sont ralentis par le milieu (ce qui dégage de la chaleur) puis vont causer de nouvelles fissions : on a initié une réaction en chaîne comme le montre la FIGURE 5.

Fission et réaction en chaîne

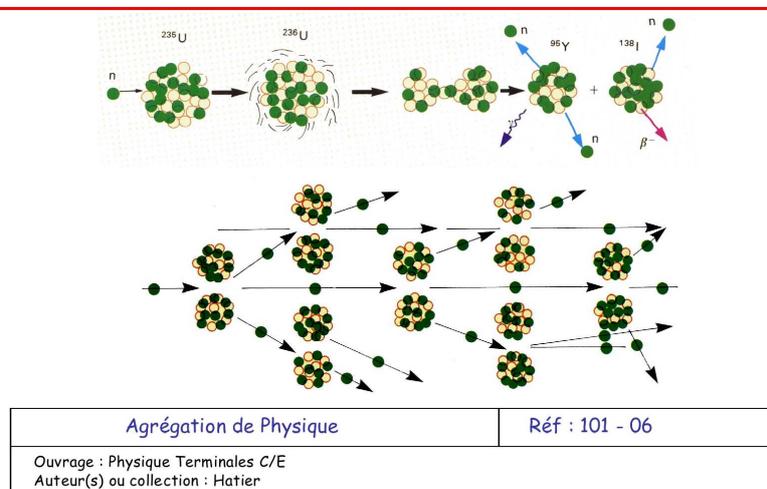


Fig. 5 Réaction en chaîne pour la fission nucléaire. ©Banqued'image



Tous les neutrons émis ne provoquent pas de nouvelles réactions de fission. Certains s'échappent du milieu tandis que d'autres sont captés par d'autres noyaux qui ne fissionnent pas. En conséquence, suivant le nombre de neutrons générant effectivement de nouvelles réactions de fission (les neutrons effectifs), la réaction peut diverger, s'arrêter ou être stationnaire.

Afin d'y voir plus clair, on introduit le *coefficient de multiplication neutronique* k tel que :

$$k = \frac{\text{nombre de neutrons effectifs à l'état } n+1}{\text{nombre de neutrons effectifs à l'état } n}$$

Trois régimes sont possibles :

- $k > 1$ régime surcritique : le nombre de neutrons croît exponentiellement et la réaction diverge,
- $k < 1$ régime sous-critique : les réactions de fission s'arrêtent instantanément,
- $k = 1$ régime critique : les réacteurs de nos centrales sont maintenus dans ce régime.

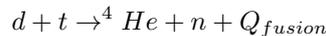
On a vu tout l'intérêt énergétique de la fission mais ces réactions produisent quantités de produits hautement radioactifs dont on ne sait que faire. Les réactions de fusion présentent le double avantage de produire encore plus d'énergie à masse de combustible égale tout en ne produisant que des produits faiblement radioactifs.

La fusion

Principe et énergie

⚡ Basdevant p.233

Le principe de la fusion est le pendant de la fission pour les atomes légers. *Deux noyaux légers fusionnent pour former un noyau plus lourd et plus stable tout en libérant de l'énergie* ex : fusion du deutérium d et du tritium t



Sur la courbe d'Aston, la fusion est effective pour les noyaux situés à gauche du fer. La fusion est possible dans ce domaine car lors de la fusion, les nucléons gagnent de l'énergie de liaison ; le noyau formé est ainsi plus stable.

L'énergie libérée est plus importante que pour une réaction de fission. La réaction de l'exemple libère 17.5MeV soit 3.5MeV par nucléons contre seulement 0.8MeV pour une réaction de fission.

OdG : énergie libérée par la fusion d'1g d'un mélange de d+t

$$E_{\text{libérée}} = \frac{1\text{g}N_A}{M(d+t)} \times Q_{\text{fusion}} \sim \frac{1\text{g} \times 6.02e23/\text{mol}}{5\text{g/mol}} \times 17.5\text{MeV} \times 1.6e-19\text{C} \sim 340\text{GJ}.$$

On se souvient que la combustion de 1kg de pétrole libère 42MJ donc

$$\boxed{1\text{g d'un mélange } d+t \iff 8\text{T de pétrole}}$$

L'intérêt de la fusion par rapport à la fission réside non pas seulement dans le surplus d'énergie qu'elle libère mais surtout dans la non production de déchets radioactifs à longue durée de vie. Par ailleurs, l'approvisionnement en combustible serait assuré pour 1 milliard d'années grâce au deutérium contenu dans l'eau de mer...

Barrière coulombienne, énergie thermonucléaire.

Les noyaux appelés à fusionner sont chargés électriquement. Il est donc nécessaire que l'interaction forte l'emporte devant l'interaction coulombienne. Cela est vérifié pour des distances $a < 10\text{fm}$.

Schéma de la barrière de potentielle

Le franchissement de la barrière peut se faire par effet tunnel et la probabilité associée est donnée par

$$P \sim \exp \left[-2 \int_a^b \sqrt{\frac{2m(V(r) - E)}{\hbar^2}} dr \right]$$

avec m la masse réduite des 2 noyaux réagissants et b définit par $V(b) - E = 0$ avec $V(r)$ le potentiel coulombien répulsif.

À noter que

- plus les noyaux sont chargés, plus la barrière est haute (V grand) et plus la probabilité est faible \Rightarrow Seuls les noyaux les plus légers fusionnent,
- plus l'énergie des noyaux est élevée, plus la probabilité est importante. ex : pour le mélange $d + t$
 $E = 1\text{keV} \Rightarrow P \sim 10^{-13}$
 $E = 10\text{keV} \Rightarrow P \sim 10^{-3}$

OdG : température autorisant les réactions de fusion

On a $T \sim \frac{E}{k_B} \sim \frac{10\text{keV}}{k_B} \sim 115$ millions de K. C'est un peu chaud ! À ces températures, la matière est sous la forme de plasmas.

Le critère de Lawson

➤ Basdevant p. 239

Expérimentalement pour que la fusion contrôlée soit intéressante, il faut que l'énergie produite par les réactions de fusion nucléaires soient au moins égales à l'énergie fournie à l'installation où ont lieu les réactions nucléaires. On dit qu'il faut dépasser le « *break-even* ».

Le critère minimal pour dépasser ce point est appelé critère de Lawson.

On définit le temps de confinement τ comme la durée pendant laquelle le plasma après sa création conserve sa température T et sa cohésion (ses propriétés thermonucléaires). Du point de vue énergétique : pour chauffer le plasma à T il faut lui fournir, par unité de volume, l'énergie $3n_i k_B T$ avec n_i la densité volumique de noyaux. Notons η le rendement de conversion de l'énergie nucléaire en énergie électrique. Le réacteur est intéressant ssi

$$E_{chauffage} < E_{elecproduit}$$

$$3n_i k_B T < \frac{n_i^2}{4} < v\sigma > Q_{fusion} \tau \eta$$

ce qui conduit au critère de Lawson

$$n_i \tau > \frac{12k_B T}{\eta Q < v\sigma >}$$

soit en terme numérique

$$n_i \tau \eta > 1.5 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s}$$

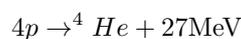
Quelques exemples :

| Type | Confinement | n (m^{-3}) | τ (s) | $n\tau$ ($\text{m}^{-3} \cdot \text{s}$) | T (K) |
|--------|----------------|-------------------------|------------|--|------------------|
| ITER | magnétique | 10^{20} | 1 | 10^{20} | $1.7 \cdot 10^8$ |
| Laser | inertiel | 10^{31} | 10^{-11} | 10^{20} | 10^8 |
| Étoile | gravitationnel | $7 \cdot 10^{30}$ | 10^{17} | $7 \cdot 10^{47}$ | $2 \cdot 10^7$ |

Nucléosynthèse stellaire

➤ Basdevant p.255

La réaction de fusion globale qui a lieu au sein du Soleil est



Supposons le Soleil à l'équilibre. Afin de conserver sa luminosité $L_S = 4 \cdot 10^{23} \text{ kW} = 2.5 \cdot 10^{45} \text{ eV/s}$, combien faut-il réaliser de réaction de fusion par seconde? Il en faut $r = \frac{L_S}{27 \text{ MeV}} = 9 \cdot 10^{37} \text{ réactions/s}$. Or pour chaque réaction, 4 protons sont consommés. Ainsi la variation du nombre de protons pendant dt est

$$\frac{dp}{dt} = -4r = -4 \cdot 10^{38} \text{ protons/s}$$

Ainsi le Soleil consomme $\frac{dp}{dt} \times m_p \sim 4 \cdot 10^{11} \text{ kg/s}$ de protons. Cette masse est à comparer avec la masse solaire $M_S \sim 10^{30} \text{ kg}$.

Si la source d'énergie du Soleil était :

- la fission : il faudrait fissionner $5 \cdot 10^{12} \text{ kg/s}$ d' ^{235}U ,
- le pétrole : il faudrait brûler 10^{19} kg de pétrole/s

Conclusions

La stabilité d'un noyau atomique dépend de son énergie de liaison : plus elle est importante et plus le noyau est stable. Cette énergie nucléaire peut servir à produire de l'électricité via l'exploitation des processus de fission ou de fusion. Les processus de fusion ont créés tous les éléments chimiques qui nous entourent.

On a entrevu les notions de radioactivité. C'est un phénomène très lié aux mécanismes de fusion et de fission et c'est aussi un enjeu de société de part les troubles de la santé qu'elle peut générer mais également de part les progrès qu'elle a engendrés en imagerie médicale par exemple. ²

Questions & commentaires ?

Au lit !!

2. L'ouverture est bidon mais il est déjà beaucoup trop tard...