

LP42 : Fusion, fission

Date : 18/02/2021

Binôme : B01 : Baudribos Fabien et Jouan Armel

En bleu : ce qui est sur diapo ou ce qui est dit à l'oral

1 Objectifs pédagogiques

- Faire quelques rappels sur la structure du noyau et sur les interactions qui permettent au noyau d'être stable
- Introduire des éléments de la physique nucléaire tels que : énergie de liaison, la formule de Bethe-Weizsäcker et le modèle de la goutte liquide
- Introduire les phénomènes de fission et de fusion avec des exemples d'application de ces phénomènes

2 Messages forts de la leçon : ce qu'il faut faire ressortir

Au cours de cette leçon, il ne suffit pas de présenter de manière générale la fission et la fusion.

Il faut aussi présenter ces deux phénomènes à l'aide d'applications concrètes.

Il faut faire ressortir l'importance de la compétition entre les différentes interactions sur le noyau qui vont soit le rendre stable, soit aboutir à une réaction nucléaire telle que la fusion ou la fission.

Rapports de jury :

2017 : Un exposé purement descriptif des réactions de fusion et de fission nucléaires est insuffisant.

2014 : Cette leçon peut être abordée de manières diverses, mais on peut raisonnablement s'attendre à ce que les candidats aient quelques notions sur la structure et la cohésion nucléaire, les formes de radioactivité et les interactions mises en jeu, les réacteurs nucléaires, le confinement magnétique.

3 Introduction générale

Niveau : L3

Prérequis : interactions gravitationnelle et électromagnétique, relativité : énergie de masse, mécanique quantique : effet tunnel

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.

4 Proposition de plan

I. Éléments de la physique nucléaire

1) Noyau

- Noyau : A_ZX_N où Z : nombre de protons
N : nombre de neutrons
A=N+Z : nombre de nucléons

- Interactions :

Interaction gravitationnelle : interaction attractive entre deux corps possédant une masse

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.

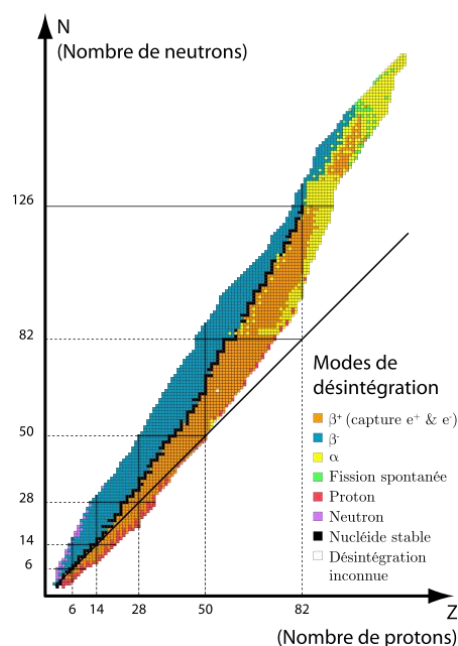
S'il n'y avait que ces deux interactions, le noyau serait instable car il y aurait répulsion entre les protons au sein du noyau.

Interaction forte : interaction attractive, indépendante de la charge, de très courte portée (environ 10^{-15} m) 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 : hors 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
cf diapo : diagramme N-Z => seulement 266 noyaux stables sur environ 3135 noyaux connus



- **Energie de liaison :** $B(\frac{A}{Z}X) = Zm_p c^2 + Nm_n c^2 - m(\frac{A}{Z}X) c^2 > 0$

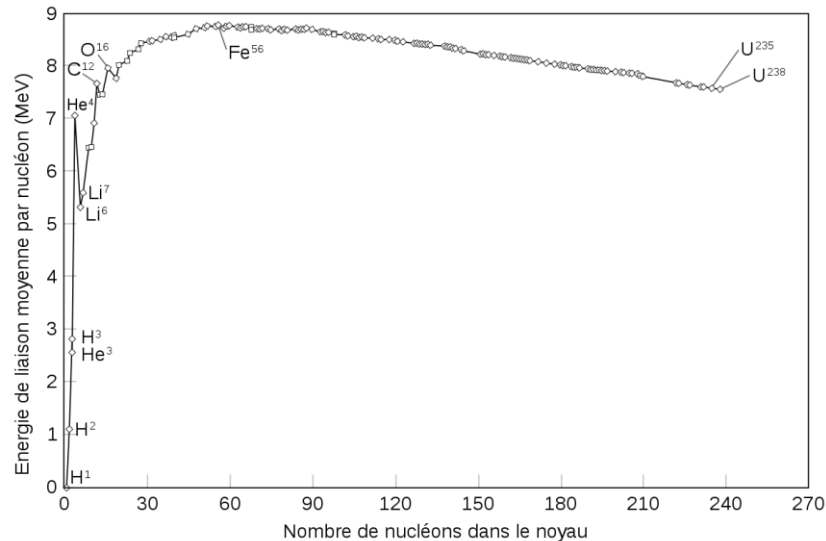
Avec m_p : masse d'un proton

m_n : masse d'un neutron

$m(\frac{A}{Z}X) = Zm_p + Nm_n - \Delta m$: masse du noyau (Δm : 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 :



Transition : 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 duquel les particules interagissent très fortement entre elles.

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

Formule de Bethe-Weizsäcker (1936-1937)

$$B(\frac{A}{Z}X) = \underbrace{a_v A}_{\text{volume}} - \underbrace{a_s A^{2/3}}_{\text{surface}} - \underbrace{a_c \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}}}_{\text{coulombien}} - \underbrace{a_a \frac{(N-Z)^2}{A}}_{\text{asymétrique}} + \underbrace{\delta(A)}_{\text{appariement}}$$

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

(Utilisation du programme Python «Bethe_Weizsacker_Ca» pour montrer l'influence de chaque terme sur l'énergie de masse)

Explication des différents termes :

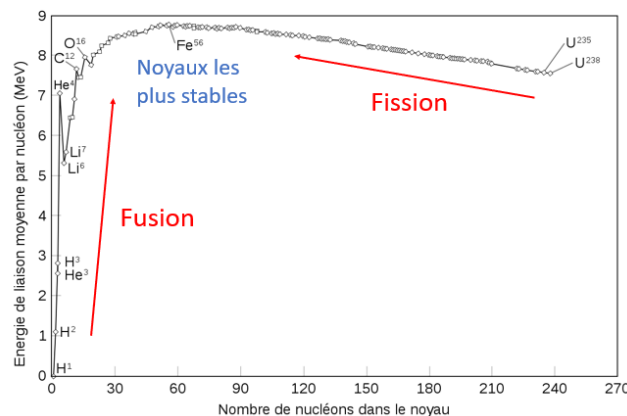
- **Volume :** en première approximation avec la courbe d'Aston on peut dire que l'énergie de liaison moyenne par nucléon B/A est une constante donc B est proportionnelle à A
- **Surface :** les nucléons à la surface du noyau ont moins de voisins que ceux à l'intérieur du noyau donc on retranche un terme 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 dû à l'interaction électromagnétique (d'où le terme proportionnel à $\frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}}$)
- 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
 $\delta(A) = a_p A^{-3/4}$ pour Z et N pairs
0 pour Z ou N impairs
 $- a_p A^{-3/4}$ pour Z et N impairs

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

Transition : 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



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

II. Fission

1) Présentation générale

Réaction de fission : ${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z_1}^{A_1}X_1 + {}_{Z_2}^{A_2}X_2 + bn + Q_f$ où b est le nombre de neutrons échangés et $Q_f = B({}_{Z_1}^{A_1}X_1) + B({}_{Z_2}^{A_2}X_2) + B(bn) - B({}_Z^AX) > 0$: énergie de fission libérée au cours de la réaction

Ordre de grandeur : $Q_f \sim 200 \text{ MeV} \gg 1 \text{ eV}$ d'une réaction chimique

Remarque : conservation des nucléons : $A = A_1 + A_2 + b$; $Z = Z_1 + Z_2$

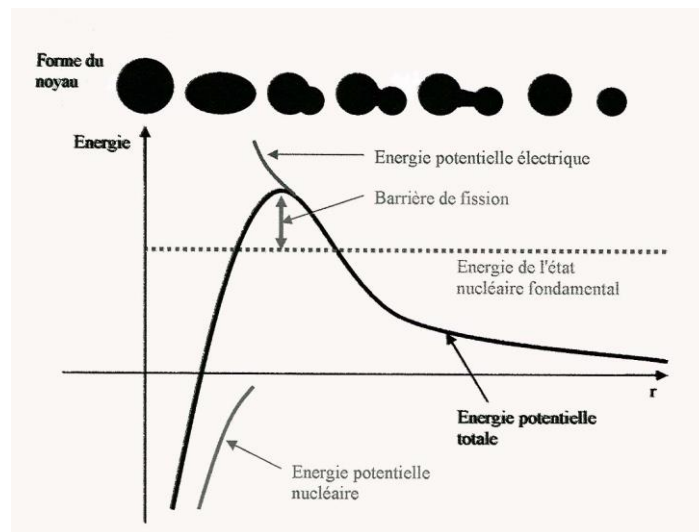
Il existe deux types de fission :

- **Fission spontanée** : désintégration de noyau père sans absorption préalable d'un corpuscule, possible seulement avec des noyaux lourds comme : ${}^{235}\text{U}$ (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



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.



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 :

$$E_{\text{tot}} = m({}^A_Z X)c^2 + m_n c^2 + E_{c,n} = (A+1-Z)m_n c^2 + Zm_p c^2 - B({}^A_Z X) + E_{c,n}$$

- Energie de l'état fondamental du noyau avec un neutron supplémentaire est :

$$E_0({}^{A+1}_Z X) = (A+1-Z)m_n c^2 + Zm_p c^2 - B({}^{A+1}_Z X)$$

- Donc l'énergie apportée par le neutron lors de la capture de celui-ci est :

$$\Delta E = E_{\text{tot}} - E_0({}^{A+1}_Z X) = B({}^{A+1}_Z X) - B({}^A_Z X) + E_{c,n}$$

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

AN : $B({}^{235}_{92}\text{U}) = 7.591 \text{ MeV}$

$B({}^{236}_{92}\text{U}) = 7.586 \text{ MeV}$

$E_a \sim 5 \text{ MeV}$

Donc : $E_{c,n} \sim 5 \text{ MeV}$

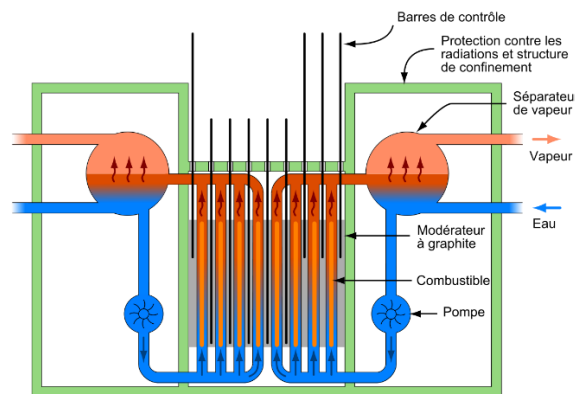
Transition : une application concrète qui utilise des réactions de fission induite pour produire de l'énergie est : un réacteur nucléaire.

3) Les réacteurs nucléaires

Un réacteur nucléaire est composé de différents composants :

- Combustible : noyau père de la réaction de fission (exemple : ^{238}U enrichi à 3% d' ^{235}U)
- Barres de contrôle : absorbent les neutrons pour ralentir fortement la réaction en cas de besoin (amovibles)
- Colporteur : récupère l'énergie de la réaction sous forme de chaleur et la transporte hors du cœur (exemple : eau)
- Modérateur : ralentit la vitesse des neutrons pour éviter que le réacteur s'emballe

Schéma d'un réacteur à eau pressurisée REP (ceux utilisés en France)



Ordre de grandeur : la fission de 1 tonne d'uranium équivaut à la combustion de 15 000 tonnes de pétrole.

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

III. Fusion

1) Présentation générale

Réaction de fusion : ${}_{Z_1}^{A_1}X_1 + {}_{Z_2}^{A_2}X_2 \rightarrow {}_Z^AX + \gamma + Q_f$ où γ : fragments tels que des neutrons, protons et $Q_f = B({}_Z^AX) + B(\gamma) - B({}_{Z_1}^{A_1}X_1) - B({}_{Z_2}^{A_2}X_2) > 0$: 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 :

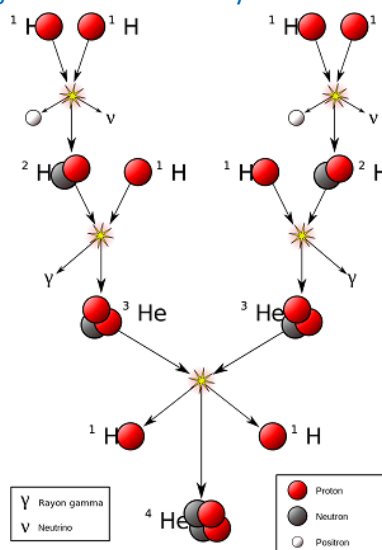
- Confinement gravitationnel : celui qui est exercé dans les étoiles
- Confinement magnétique : utilisation de champs magnétiques afin de confiner le plasma de particules (le plus étudié à l'heure actuelle)
- Confinement inertiel : utilisation de lasers grandes puissances

Transition : les applications les plus connues de la fusion sont les réactions nucléaires dans les étoiles

2) Réactions nucléaires dans les étoiles

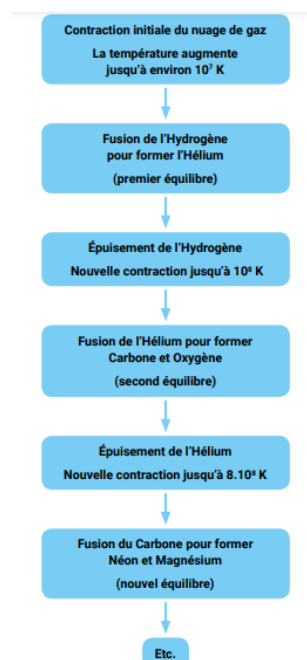
Modèle le plus simple de la formation d'une étoile :

- 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' ${}^3_2\text{He}$, ${}^4_2\text{He}$ (fin du premier cycle),... tout en libérant de l'énergie sous forme de rayonnement



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

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)



5 Conclusion de la leçon, ouverture possible

On a donc étudié au cours de cette leçon 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.

6 Outils pour illustrer la leçon (expériences, simulation numérique, ...)

Pas de manip possible

Utilisation d'un programme python pour montrer l'influence de l'ajout de chaque terme dans la formule de Bethe-Weizsäcker : pour les ajouter au fur et à mesure j'ai inséré les lignes 2294 à 2297 qu'il suffit de retirer une à une pour ajouter chaque terme au calcul du programme.

7 Questions du correcteur

Correction étudiante :

- Quelle expérience a mise 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 ${}^4_2\text{He}$; désintégration β^+ : ${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z-1}^AY + e^+ + \nu_e$; désintégration β^- : ${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z+1}^AY + e^- + \bar{\nu}_e$; capture électronique : ${}_Z^AX + e^- \rightarrow {}_{Z-1}^AY + \nu_e$
- 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 obtenu avec le modèle en couche (ne pas en parler pendant la leçon)
- Origine de $R=R_0A^{1/3}$? car avec le modèle de la goutte liquide, on a le volume qui est proportionnel à A et 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 : $2 E_c + E_p = 0$

Questions de ALD :

- 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 photon alors qu'il y a plusieurs gluons
- Réactions des désintégrations β^- et β^+ ? cf plus haut
- Quelle autre réaction nucléaire fait intervenir l'effet tunnel dans sa description ? la désintégration α (Gamow)
- 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 stable ? car localement l'interaction forte doit compenser l'interaction EM, hors 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 B-W ? 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
- Dans un réacteur à eau pressurisée, quel est le rôle des barres de contrôle, du combustible ? cf leçon
- Quelle 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
- Qu'est-ce qu'un positron ? C'est l'antiparticule de l'électron : certaines de ces grandeurs physiques sont opposés comme sa charge
- Expliquer les désintégrations successives vers un noyau stable ? Parler des paraboles de masse et des désintégrations β^- et β^+ qui alternent

8 Remarques importantes du correcteur

Le plan est bon mais attention de ne pas passer trop de temps sur la première partie car le titre de la leçon est quand même « fusion fission ».

Attention aussi à passer autant de temps dans la partie fusion et fission.

On peut aussi rajouter un calcul de plus : calcul du terme coulombien dans la formule de B-W par exemple.

9 Bibliographie pour construire la leçon

- Physique nucléaire appliquée, Frédéric Mayet, de boeck
- Nuclear and Particle Physics, W.S.C. Williams, Oxford (drive)
- Energie nucléaire : Fission et fusion, Pierre Charles, ellipses

10 Titres alternatifs

« Stabilité des noyaux »

Dans ce cas, mettre l'accent sur les désintégrations, paraboles de masse, faire une application avec la fusion ou la fission