

Titre : Structure et stabilité des noyaux atomiques. Applications de l'énergie nucléaire

Présentée par : Alfred Hammond

Rapport écrit par : Léa Chibani

Correcteur : Elias Khan

Date : 02/05/2020

Bibliographie de la leçon :

Titre	Auteurs	Éditeur	Année
Cours Noyaux et Particules /Elias Khan			

Plan détaillé

Niveau : Licence

Prérequis : interactions fondamentales/radioactivité/constitution du noyau

Bibliographie : Cours de Mr Khan/

Introduction : Au cours du 20^{ème} siècle, plusieurs études ont été menées afin de connaître la structure des noyaux et développer des applications

-Rutherford (1911): noyau très localisé par rapport à la densité de charge électronique

-Marie Curie découvre la radioactivité.

-Jusqu'à la conception de la bombe H et des premières centrales nucléaires afin de produire de l'énergie électrique.

Problématique : Quel est la structure des noyaux et comment peut-on récupérer de l'énergie grâce à leur stabilisation et comment l'utilise-t-on ?

I) Stabilité des noyaux et radioactivité

A) Radioactivité et structure du noyau

-1896 Becquerel découvre la radioactivité par hasard. Pierre et Marie Curie, pionniers dans la radioactivité artificielle → des noyaux atomiques (pères) peuvent se transformer en d'autres noyaux (fils)

-Plusieurs types de radioactivité : bêta +/bêta - / alpha : rappel des équations

-Noyau = système de N neutrons et Z protons liés. Certains sont instables et donc se désintègrent en noyaux fils plus stables. [slide Vallée de la stabilité]

-Est-ce que ces réactions libère de l'énergie ? si oui peut-on la récupérer ?

OUI et on va appeler l'énergie libérée **l'énergie de liaison** qui correspond à de l'énergie de masse.

-Définition de l'énergie de liaison associée à une réaction de désintégration radioactive $B(A,Z)$, définition des termes la composant.

B) Origine de la cohésion des noyaux

-Comment expliquer que les protons et neutrons qui coexistent forme un édifice avec une grande cohésion ?

-En fait, il y a plusieurs interactions qui s'établissent entre les nucléons : certaines stabilisantes/d'autres déstabilisantes pour la cohésion de l'édifice.

-Outil qui permet de comprendre la cohésion des noyaux : **l'énergie de liaison**

-Modèle de la goutte liquide : Bethe Weissäcker analogie avec la cohésion d'une goutte liquide

$$B(N, Z) = a_V A - a_S A^{2/3} - a_C \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_A \frac{(N - Z)^2}{A} + \delta$$

-Explication de l'origine de chaque terme ; termes stabilisants/ d'autres déstabilisant

-En fait $B(A,Z)$ est un curseur de la stabilité des noyaux

C) Critère de stabilité

-Si on a une réaction $1+2 \rightarrow 3+4$, on définit le quotient de réaction $Q=B_3+B_4-B_1-B_2$ qui représente l'énergie libérée par la réaction.

→ **une réaction de désintégration peut libérer de l'énergie qui peut-être in fine utilisée !**

-Pour cela il faut $Q>0$.

-Ce qui est plus intéressant est la quantité libérée par nucléons : $Q/A = \langle B/A \rangle_{\text{sorti}} - \langle B/A \rangle_{\text{entrée}}$

-Courbe d'Aston : représente $B/A=f(Z)$.

-La stabilité d'un édifice est maximale lorsque B est maximale à A constant pour une réaction de désintégration.

-On calcule alors $dB/dZ|_{A=\text{cst}}$.

-Analyse de la courbe : **les noyaux veulent augmenter leur énergie de liaison et tomber dans la vallée**

de la stabilité → Fusion pour les noyaux légers / fission pour les noyaux lourds.
→ donc on peut prédire quelles réactions sont possibles pour récupérer de l'énergie

II) Utilisation de l'énergie de la fission nucléaire

A) Paramètre de fissilité

-Définition de la fission

-Comment un noyau peut se déformer pour en donner deux ? **Il existe une barrière de fission [slide]**

En fait compétition entre terme énergie de surface (minimise la déformation) VS terme énergie de répulsion coulombienne qui tend lui à déformer le noyau → conséquence de la compétition : barrière de fission

-Comment surmonter cette barrière ? **Paramètre de fissilité définition**

1)Fission induite par neutrons lents : les noyaux lourds ont beaucoup de protons, donc un terme d'énergie de répulsion coulombienne grand. Ainsi il suffit d'envoyer un neutrons avec une certaine énergie cinétique (ici faible d'où neutrons lents), pour qu'il soit capturé par un noyau et que l'énergie de liaison acquise permette de surmonter la barrière de fission.

2)Fission spontanée : se fait par effet tunnel, le paramètre de fissilité est sup à la valeur critique naturellement.

-Comment utiliser cette énergie libérée par la fission ?

B) Fonctionnement d'une centrale EPR

-Comment utiliser cette énergie libérée par la fission ?

-Equation de la réaction de l'Uranium 235 avec un neutron

-description d'une centrale EPR : Réacteur pressurisé européen.

-Principe de la réaction en chaine ; combustible/caloporteur/modérateur/ barre de contrôle/déchets problème de gestion

-Cependant, la production de noyaux lourds fils est un problème, ainsi que leur diversité. Autre solution : on peut envisager l'autre côté de la courbe d'Aston → **la fusion**

III)La fusion, une solution miracle ? (cette partie n'a presque pas été traitée)

D'après la courbe d'Aston (Fig. 1.2), la fusion d'éléments légers est exo-énergétique. Les avantages sont i) l'abondance des éléments légers comparés à ceux nécessaires à la fission, ii) l'absence de la très grande variété de déchets, contrairement à la production d'énergie par fission, et iii) la plus grande énergie libérée par nucléon en raison de la pente plus prononcée de ce coté de la courbe d'Aston.

A) La fusion dans les étoiles

B) La fusion sur Terre

C) Propriétés

Je vous réfère ici au Poly de Monsieur Khan car, tout y est très bien expliqué 😊

Questions posées par l'enseignant

Question 1 : quand tu as écrit la réactivité beta +, tu as écrit : noyau + électron ? Peut-il y avoir une réactivité beta avec un électron ?

Il faut faire attention, la désintégration bêta – : produit un électron et un antineutrino//bêta + : produit un positron et un neutrino. La capture électronique est le processus tel que le noyau père absorbe un de ses

propres électrons orbitaux. C'est un processus qui est en compétition avec la désintégration bêta+. En effet, les deux donnent le même noyau fils

Question 2 : Est-il possible d'expliquer pourquoi certains atomes sont radioactifs et certains non ? C'est quoi la radioactivité ?

-La radioactivité décrit la transformation d'un noyau père (spontanée ou stimulée) en un noyau fils (plus stable).

-Certains nucléides peuvent effectuer des désintégrations radioactives spontanément si l'énergie de désintégration Q (où le quotient de réaction) est positif. Le coefficient de réaction est : $1+2 \rightarrow 3+4$

$Q = -B_1 - B_2 + B_3 + B_4 > 0$ alors les énergies de liaisons des noyaux fils sont plus grandes ; Noyau fils plus stable \rightarrow désintégration spontanée.

Question 3 : Au niveau des interactions, quels rôles jouent l'interaction EM et l'interaction faible dans la stabilité des noyaux ?

-Répulsion coulombienne (EM) a pour conséquence que deux protons se repoussent (force répulsive « longue » portée)

-interaction faible permet d'expliquer que les neutrinos pénètrent très facilement la matière. En effet, ils ne sont pas chargés donc ne subissent pas la répulsion coulombienne. Pour expliquer ce qui les font interagir on parle d'interaction faible. Pourquoi **faible** ? Car en fait un neutron libre a un temps de vie très long par rapport au temps de vie des particules libres qui subissent l'interaction forte. **To sum up : plus l'interaction est forte, plus les processus qu'elle induit sont rapides**

Question 4 bis : Interactions liées aux types de radioactivité ?

-Radioactivité bêta+/- : interaction faible

-désintégration alpha : interaction forte / électromagnétique

Question 5 : Pourquoi le rayon du noyau se comporte en $A^{1/3}$?

Le rayon du noyau est R . La densité du noyau est presque indépendante du nombre de masse A . Donc le nombre de nucléons contenus dans le noyau est simplement proportionnel à son volume $\frac{4}{3}\pi R^3$ d'où : le résultat

Question 5 bis : Qu'est ce qui justifie ce postulat : le volume du noyau est proportionnel au nombre de nucléon ?

Question 6 : Le terme d'appariement est-il un terme attractif ou répulsif dans la formule de Weizsäcker ?

-Si Z pair et N pair : le terme $\delta > 0$ il est stabilisant ie il augmente l'énergie de liaison

-Si pair et impair : $\delta = 0$ pas d'effet

-Si Z impair/ N impair : $\delta < 0$ il est déstabilisant ie l'énergie de liaison diminue, l'édifice est moins stable

Question 7 : Expliquer d'où vient l'expression de Q/A ?

Ici il faut faire attention. Pour la réaction $1+2 \rightarrow 3+4$ on a

$$Q = B_3 + B_4 - B_1 - B_2$$

$$Q/A = (B_3 \cdot A_3/A_3 + B_4 \cdot A_4/A_4 - B_1 \cdot A_1/A_1 - B_2 \cdot A_2/A_2)/A$$

Question 8 : Comment expliquer la forme générale de la courbe d'Aston ?

Forme générale vient de l'ajustement de la formule de Bette Weizsäcker ?

Question 9 : D'où viennent les écarts entre l'ajustement via la formule de Weizsäcker et la courbe d'Aston ?

Question 9 bis : Les couches sont-elles prévues par la formule de Weizsäcker?

-Les écarts viennent du modèle en couche. En effet, les protons et neutrons sont des fermions. Ils sont régis par la stat de Fermi-Dirac. Et l'énergie des noyaux est quantifiée comme celle d'un OH. Il y a des structures très stables. On peut faire l'analogie avec les configurations électroniques des atomes. Pour des

atomes dont les couches électroniques sont complètes il y a une stabilité. Ici pareil.
-Le modèle en couche n'est pas prévu par la formule de Weizsäcker

Question 10 : Pourquoi dans le calcul sur ..., on dérive par rapport à A constant ?

Dans toutes désintégrations, il y a conservation de **la charge, le nombre de masse A, la quantité de mouvement, du moment cinétique et bien sûr de l'énergie de masse (rien ne se perd, rien ne se crée....tout se transforme lol)**

Question 11 : Peut-on expliquer l'existence de la barrière de fission dans la courbe montrant le processus de fission ?

Pour fissionner il faut arriver à déformer le noyau → donc vaincre la tension superficielle cohésive. L'énergie qui permet d'aider à la déformation du noyau est l'énergie de répulsion coulombienne. Il y a donc une compétition entre ses deux formes d'énergie : la barrière de fission résulte de cette compétition **énergie de déformation VS répulsion coulombienne**

Question 12 : Ce n'était pas clair, pourquoi les neutrons lents aident à faire fissionner un noyau ?

En fait, dans les «gros » noyaux avec Z grands, le terme de répulsion coulombienne est assez grand pour vaincre avec un apport très faible d'énergie extérieur la tension de surface cohésive. Ainsi, un neutron avec une certaine énergie cinétique permet d'engendrer la déformation et la fission du noyau (pourvu que son $E_c \gg$ barrière de fission). Le fait qu'il soit lent, augmente les chances d'être capturé par le noyau père car il reste plus longtemps au proche contact de celui-ci.

Question 13 : Tu as dit qu'il y avait qu'une dizaine de noyaux qui fissionnent spontanément ... et pas d'autres, comment on sait ça ?

Pour qu'un noyau soit dit **fissile**, il faut que le terme d'énergie répulsion Coulombienne \gg terme tension de surface cohésive afin que le noyau se déforme. Cela donne : **$Z^2/A =$ paramètre de fissibilité. De plus, il faut savoir que la fission spontanée utilise l'effet tunnel pour passer la barrière de fission. Pas besoin d'un neutron lent qui apporte l'énergie nécessaire cette fois-ci**

$$a \frac{Z^2}{A^{1/3}} > b A^{2/3}, \text{ soit } \frac{Z^2}{A} \gtrsim 30$$

Question 13 bis : Combien fissionnent non spontanément avec neutrons lents ?

Il n'y a que 7 noyaux qui fissionnent par absorption d'un neutron lent. Ces noyaux ont tous en commun d'avoir un nombre de neutrons impairs. Ainsi grâce à la capture du neutron, leur nombre de neutrons devient pair, et il gagne en stabilité car leur énergie de liaison augmente.

Une caractéristique commune à ces 7 noyaux est leur nombre impair de neutrons. En effet, un noyau ayant N impair et capturant un neutron, libère l'énergie d'appariement gagnée par la formation d'une paire supplémentaire de neutrons, ce qui permet de passer au-dessus de la barrière de fission. Ainsi la conservation de l'énergie totale de la réaction $n + (A-1) \rightarrow A^*$ donne :

$$m_n c^2 + M(A-1)c^2 = M(A)c^2 + E^* \quad (2.2)$$

puisque la réaction se fait quasiment au repos. L'énergie d'excitation E^* gagnée par le noyau A est donc

$$E^* = [m_n + M(A-1)]c^2 - M(A)c^2 = S_n, \quad (2.3)$$

d'après la définition (1.3) de l'énergie de séparation. Il existe ainsi quelques noyaux pour lesquels S_n est supérieur à la barrière de fission. Par exemple $S_n(^{236}\text{U})=6,5$ MeV. La capture d'un neutron lent par le ^{235}U donne donc un noyau de ^{236}U qui fissionne. En revanche la capture d'un neutron lent par le ^{238}U donne un noyau de ^{239}U qui ne fissionne pas, car $S_n(^{239}\text{U})=4,8$ MeV qui est inférieur à la hauteur de la barrière de fission. On voit ici le rôle crucial de l'appariement et la nécessité d'avoir un noyau ayant un nombre impair de neutrons pour permettre la fission suite à la capture d'un neutron lent.

On appellera par convention noyau fissile, les noyaux comme le ^{235}U qui donnent lieu à une fission suite à une capture d'un neutron thermique.

Question 14 : Quelle est la limite d'enrichissement de l'uranium 235 ?

Dans un réacteur à eau pressurisée, on a quel taux d'enrichissement du coup ?

-L'**enrichissement de l'uranium** est le procédé consistant à augmenter la proportion d'isotope fissile dans l'uranium.

-En fait, il y a une notion de masse critique qui permet d'enclencher la réaction en chaîne afin de faire plusieurs fissions. La **masse critique** d'un matériau fissile est la quantité de ce matériau nécessaire au déclenchement d'une réaction nucléaire en chaîne de fission nucléaire.

Elle dépend des propriétés nucléaires du matériau considéré (section efficace de fission, et nombre de neutrons produits par la fission), mais aussi de ses propriétés physiques (en particulier de sa densité), de sa forme et de sa pureté.

En effet, un matériau fissile est un matériau qui contient des atomes lourds (ex. : uranium 235) qui se cassent (fission) sous l'impact d'un neutron. Le résultat de cette fission consiste en des produits résiduels de fission, de l'énergie (principalement thermique) et l'émission de deux à trois nouveaux neutrons, qui eux-mêmes vont casser d'autres noyaux, etc., d'où le terme de « réaction en chaîne ».

Néanmoins, ce processus est théorique. En simplifiant, tous les neutrons ne sont pas absorbés par un noyau fissile : certains sont absorbés par des impuretés, d'autres sortent du matériau sans avoir pu rencontrer un noyau à casser.

Ainsi, en faisant varier la taille, la densité, la pureté du matériau, la forme même, une plus grande proportion de neutrons va être efficace. Pour une quantité minimale de matériau, la réaction en chaîne peut démarrer, c'est ce qu'on appelle la « masse critique ».

Dans une centrale, justement on contrôle les réactions pour pas qu'il n'y ait de réactions en chaîne qui diverge bien que les échantillons soient de masse > masse critique. Pour cela, on met des modérateurs et on enrichit

-Le **taux d'enrichissement** est de quelques pourcent en uranium 235

Question 15 : Pourquoi l'eau lourde peut être utile dans le cadre du ralentissement des neutrons ?

L'eau lourde sert de modérateur efficace lorsque l'on utilise l'uranium avec un taux naturel en Uranium 235 (qui est le noyau fissile) car l'eau lourde ne capture que très faiblement des neutrons.

2.2.3 Modérateur

Dans le cas de neutrons lents, la probabilité de fission domine celle de capture de neutron. Il est ainsi très avantageux de ralentir les neutrons rapides produits par la fission. Cela se passe par collisions élastiques sur un noyau léger, de manière à ralentir efficacement les neutrons. L'eau joue en général ce rôle : elle est donc à la fois caloporteur et modérateur (fonctionnement d'un REP-Réacteur à Eau Pressurisé). Il existe aussi des réacteurs (comme par exemple les RMBK russes) qui ont un modérateur en graphite. Dans le cas de l'eau lourde, sa faible probabilité de capture de neutrons permet d'en utiliser une plus grande quantité que l'eau normale, et ainsi ralentir les neutrons pour atteindre le régime avantageux des neutrons lents même avec de l'uranium naturel.

Question 16 : Pourquoi faut-il que la collision ait lieu avec un noyau pas trop gros pour qu'il y ait un ralentissement efficace ?

-Alors là, il faut se plonger dans l'étude des collisions. On sait que le transfert d'énergie cinétique se fait efficacement si les deux particules ont des masses très proches. Donc comme le neutron a une masse très très faible, il ne faut pas des atomes trop lourds/trop gros pour les ralentir.

Question 17 : Peux-tu préciser ce que tu voulais dire quand tu as dit que si la réaction s'emballait, ça faisait exploser la centrale ?

Question 17 bis : L'explosion est de quelle nature ? Et pourquoi ?
(je n'ai plus le contexte donc difficile d'y répondre)

Question 18 : Quand tu as parlé de Fukushima, tu as dit que la réaction était auto-entretenue, c'est-à-dire ?

-En fait, il y a eu défaillance du système de refroidissement, qui n'a pas refroidi le milieu contenant les déchets nucléaires qui continuaient, eux, à produire de l'énergie thermique. Il y a eu surchauffe et le tout a explosé.

2.2.5 Déchets

Le principal défaut d'un réacteur à fission est la production de déchets qui représente notamment l'ensemble des noyaux fils générés lors de fissions et en bout de chaîne de désintégration β^- . Ils sont donc variés, avec des durées de vie très différentes comme discuté ci-dessous. La conséquence est double : i) même lorsque la réaction en chaîne est coupée, les déchets continuent à produire de l'énergie en raison de leur désintégrations Bêta (puisque $Q_\beta > 0$ par définition d'une radioactivité). Ainsi juste après l'arrêt d'un réacteur, la puissance produite est encore de l'ordre de 6% de la puissance nominale. Il faut donc continuer à absorber cette chaleur dégagée sinon l'enceinte monte en température et provoque des réactions chimiques parasites (oxydation de gaines de combustibles en Zr avec dégagement d'hydrogène), pouvant mener à des explosions (au sens chimique et non nucléaire). ii) Certains déchets résiduels ont une très longue durée de vie β^- (allant jusqu'à 20 millions d'années), il faut donc les stocker et les isoler, ou essayer de les transmuter/recycler. Il n'y a pas à l'heure actuelle de solution bien établie à ce problème.

Les actinides mineurs (Am, Np, Cm, ...) produits par capture de neutron sur l'uranium ou le polonium constituent aussi des déchets. Ils sont émetteurs alpha avec des durées de vie souvent supérieures à 10 000 ans.

Question 19 : La première réaction que tu as montrée dans les étoiles était $p + p \rightarrow d + e^+ + \nu_e$, pourquoi on pourrait pas faire $p + n \rightarrow d + \gamma$ pour devenir du deutérium ?
Il ne peut pas y avoir de réaction entre p et n car le temps de vie du neutron au sein du Soleil est très

faible.

Un premier exemple de fusion avec dégagement d'énergie est la fusion stellaire. Le rayonnement du Soleil s'obtient par une succession de réactions de fusion d'éléments légers, initiée par une réaction de fusion par interaction faible :



En effet, le neutron isolé étant absent du Soleil en raison de son temps de vie ($\tau_n \simeq 15$ min), la réaction ci-dessus est la seule pouvant conduire à la fusion vers un élément $A=2$, car le deuton est le seul noyau $A=2$ lié. Le Soleil compense la faible production par interaction faible par son grand

Question 20 : Pourquoi, si le neutron a un temps de vie très faible, il est stable dans un noyau ?

-Le neutron est très stable dans le noyau car il suit le principe d'exclusion de Pauli (c'est un fermion) Ainsi il remplit des niveaux d'énergie. On pourrait s'attendre à ce que le neutron fasse beaucoup de collisions avec les autres particules et diffuse. Or, beaucoup de niveaux énergétiques sont déjà occupés, ainsi la probabilité qu'il en occupe un autre après collision est faible. Donc les neutrons sont assez stables dans le noyau malgré son temps de vie faible

Question 21 : Tu as dit que l'uranium était produit dans les étoiles ?

-Non c'est dans les supernovas

Question 22 : Du coup comment l'uranium est produit ?

-Lors d'événements de types supernova/mort d'étoiles, il y a libération d'une énorme quantité de neutrons. Ainsi, certains noyaux peuvent se retrouver avec Z protons et 200 neutrons. Ensuite, il y a des désintégrations radioactives (béta – qui convertissent neutrons en protons) pour former des édifices stables présents dans la vallée de la stabilité. 😊

Question 23 : Peut-on retrouver la valeur de l'ordre de 1MeV pour la fission de l'uranium sur la courbe d'Aston ?

Oui il suffit de regarder l'énergie de liaison par nucléons du noyau père (Uranium environ 7,5 MeV) et des noyaux fils (environ 8,5 MeV). Donc 1 MeV de diff, et il y a environ 240 nucléons, donc...une réaction de fissions produit environ (en ordg) 240 MeV → **énorme pour un seul événement atomique...(c'est par exemple 1 million de fois plus que l'énergie libérée par la combustion d'une molécule d'essence.....)**

Commentaires donnés par l'enseignant

Utilisation du plan classique structure du noyau, puis fission, puis fusion

La partie sur la structure du noyau a été traitée de manière pertinente

La partie fission a été traitée de manière moins précise

La partie fusion, toujours délicate (cf ci-dessous), n'a pas été traitée de manière très structurée. La fusion stellaire a bien été abordée, mais il faut bien en délimiter le cadre afin de ne pas ouvrir la porte à trop de notions (et de questions) sur l'astrophysique.

Bonnes réponses aux questions en général.

Partie réservée au correcteur

Avis général sur la leçon (plan, contenu, etc.)

Cette leçon est délicate car elle fait appel à des notions (selon la dénomination au programme officiel du concours). Il faut donc en permanence se poser la question de la pertinence des explications selon le critère équation vs. notion.

Plan classique mais pertinent : structure du noyau, puis fission, puis fusion

Notions fondamentales à aborder, secondaires, délicates

Il est essentiel de présenter la structure du noyau avec les notions clés d'énergie de liaison et de radioactivité (Q de réaction >0). Le modèle de la goutte liquide est un incontournable qui permet de préparer les explications relatives à la fission et la fusion, entre autres.

La structure en couches du noyau, ainsi que la superfluidité nucléaire, sont deux notions qui peuvent aussi apporter de nombreux éclaircissements à la leçon, mais peuvent donner lieu à des lourdeurs et de la confusion, si elles ne sont pas utilisées de manière précise et synthétique.

Un autre point délicat de cette leçon est de vouloir trop en dire, avec un plan assez chargé lors du triptyque classique : i) structure du noyau ii) fission iii) fusion. En effet, la partie sur la fusion est la plus ardue à expliquer en termes d'équations simples et pertinentes, et il faut redouter une fin de leçon trop rapide et vague. Cela peut être par exemple évité en ne donnant que la fission comme exemple de production d'énergie nucléaire, et en n'évoquant la fusion que dans les ouvertures ou la conclusion.

Expériences possibles (en particulier pour l'agrégation docteur)

Bibliographie conseillée

Fascicule dédié de E. Khan
Le monde subatomique (L. Valentin) : chap 4
Physique Nucléaire (Le Sech, Ngo) : chap 10