

Titre : LPS1 : Structure et stabilité des noyaux atomiques

Présentée par : Sallé Lucie

Rapport écrit par : Meyre- -Baqué Izia

Correcteur : Elias Khan

Date : 17/02/2021

Bibliographie		
Titre	Auteurs	Éditeur
Manuel de radioactivité	Jacques Foos	Hermann
Physique nucléaire, des quarks aux applications	Claude Le Sech et Christian Ngo	Dunod 2010
Le monde subatomique	Luc Valentin	Hermann 1995

Plan détaillé

(indiquer parties, sous-parties, 1 ou 2 phrases d'explications par sous-partie, et références)

Niveau choisi pour la leçon : Licence
khan@ipno.in2p3.fr

Pré-requis :

Radioactivité de terminale, interactions fondamentales, structure électronique des atomes, énergie de masse, électrostatique, effet tunnel

Introduction

- Découverte de la radioactivité par Becquerel / Pierre et Marie Curie et du noyau par Rutherford
- Comprendre la structure de la matière : ces avancées ont permis de développer des sources d'énergie considérables

1. Le noyau : structure et stabilité

1.1 Cohésion du noyau

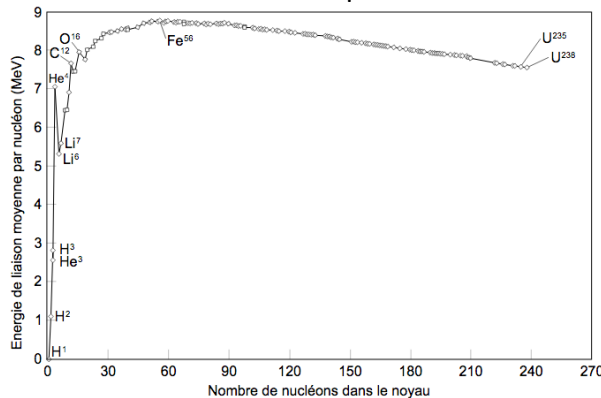
- Noyau (avec A nucléons : Z protons et N neutrons). Le noyau est un système lié d'environ une dizaine de fermi.
- En effet, dans le noyau, l'interaction électrostatique répulsive due aux Z protons est présente mais on observe des noyaux stables : on a donc forcément une interaction

stabilisante : c'est l'interaction forte. On a donc compétition entre interaction coulombienne et interaction forte.

- On peut définir plusieurs grandeurs importantes liées aux noyaux (le rayon : $R = r_0 A^{1/3}$ et l'énergie de liaison (elle assure et quantifie la cohésion du noyau : $Mc^2 = Nm_n c^2 + Zm_p c^2 - B$, avec M la masse du noyau, que l'on détermine expérimentalement.
- **Donner la valeur $r_0=1,2$ fm**

On rappelle que $m_n c^2 = 939,56 \text{ MeV}$ et $m_p c^2 = 938,27 \text{ MeV}$, $m_u c^2 = 931,49 \text{ MeV}$) Donner des ODG pour des noyaux. On utilisera plutôt l'énergie de liaison par nucléon : B/A

- Présenter des résultats expérimentaux obtenus pour cette énergie : courbe d'Aston



- ➔ On va essayer de développer des modèles simples qui vont nous permettre de comprendre l'évolution générale de la courbe d'Aston, et de voir aussi quelques différences avec l'expérience.

1.2 Modèle de la goutte liquide

On utilise un modèle qui repose sur l'analogie entre le noyau et un fluide

SLIDE : potentiel d'interaction entre deux nucléons et potentiel d'interaction entre deux molécules dans un fluide.

On peut modéliser le noyau par une goutte de liquide incompressible dans laquelle les A nucléons forment une assemblée compacte. L'idée est donc ensuite d'essayer de quantifier l'énergie de liaison.

Bethe et Weisäcker (1935) ont alors mis au point une formule semi-empirique, basée sur des énergies différentes qui pourraient être présentes dans le noyau.

On trouve en effet plusieurs termes que l'on va chercher à expliquer : $B = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_a \frac{(N-Z)^2}{A} + \delta$

Faire le détail des explications de chaque terme.

Donner les ODG des coefficients calculés par B&W.

On compare cela avec la courbe d'Aston :

- il n'y a pas de **très** bon résultats pour $A < 16$: car on ne peut pas faire de modèle semi-statistique

- on a des assez bons résultats pour les noyaux lourds à quelques exceptions près (**ce sont les effets de couches, qui ne sont pas décrits par le modèle de la goutte liquide**)

On va essayer de comprendre les écarts au modèle et les observations expérimentales pour expliquer la stabilité des noyaux.

1.1 Stabilité des noyaux

Donner la définition d'atome radioactif

La stabilité des noyaux est quantifiée grâce à l'énergie de liaison par nucléons. On peut faire plusieurs observations :

- L'expérience montre qu'il n'y a pas tant que ça de noyaux stables (**300 sur 7000 environ**) : montrer la carte des noyaux avec la vallée de la stabilité (qui correspond aux noyaux stables) et les autres noyaux qui sont instables : Ces noyaux instables vont donc se désintégrer par radioactivité. Montrer les équations de la radioactivité bêta + et bêta -. Pour des atomes légers, on a les atomes stables qui correspondent à $Z=N$, et plus on augmente le nombre de nucléons, plus l'interaction coulombienne a un rôle fort, donc on s'éloigne de la droite $N=Z$
- On observe une stabilité particulière pour quelques atomes notamment pour l'Hélium 4, que l'on appelle la particule α , ou C12 et O16. Cf Courbe d'Aston

On peut expliquer cela si on se place dans le cadre d'un modèle en couches. Dans le noyau, on a un système de fermions liés, donc par analogie à la structure électronique de l'atome en couche, on peut construire un même modèle, on a confinement des nucléons donc quantification des niveaux d'énergie : montrer les couches avec le potentiel de Wood Saxon pour les neutrons et les protons (barrière coulombienne).

Ce remplissage de couche fait apparaître des nombres magiques, pour lequel les couches électroniques sont remplies (2,8,20...). Les noyaux magiques sont donc particulièrement stables.

- ➔ Si on regarde la courbe d'Aston, on a deux processus différents qui peuvent améliorer la stabilité selon le numéro atomique : fusion des noyaux légers et fission des noyaux lourds. Ces deux phénomènes vont permettre de créer de l'énergie. Ils ont un grand intérêt à être étudiés et compris.

2. Application à la production d'énergie nucléaire

2.1 Principe de la fission

La fission, comme on vient de le voir consiste en le fait de scinder des atomes lourds pour augmenter la stabilité : cela passe donc forcément par une déformation du noyau

Il y a donc une barrière de potentiel à passer = barrière de fission. On peut la passer de deux manières différentes :

- Fission spontanée : par effet tunnel. La fission spontanée ne concerne pas beaucoup d'atomes, que les noyaux extrêmement lourds, qui ont une énergie de liaison par nucléon faible. L'énergie libérée par la fission est énorme, indépendamment du noyau lourd impliqué : Q environ égal à 200 MeV (**se reporter à la courbe d'Aston**). Donner des exemples de noyaux.

La fission spontanée ne nous intéresse pas pour la production d'énergie nucléaire, parce **la probabilité de fission est trop faible (demi-vie de l'ordre de 10^{16} ans pour la région de l'uranium)**

- Fission induite : Pour passer la barrière de potentiel, on envoie un neutron sur un noyau. Il y a deux sortes de neutrons : les neutrons lents (énergie petite (**$0,01\text{eV}$**) devant la barrière mais probabilité de capture par le noyau importante) et les neutrons rapides (ils ont assez d'énergie (**MeV**) pour passer la barrière de fission, mais probabilité de capture assez faible). Pour les neutrons lents : Pour un noyau avec un nombre de nucléon impair, on va pouvoir avoir appariement et donc un surplus d'énergie qui permet de passer la barrière par appariement et non par énergie cinétique

Ecrire la fission induite de l'uranium 235 et donner des ordres de grandeur d'énergie libérée.

- La réaction va produire des noyaux qui ont une énergie de liaison plus forte et des neutrons rapides qui vont pouvoir être réutilisés. On va appliquer ceci à la production d'énergie nucléaire avec les réacteurs à fission (REP)

2.2 Application aux réacteurs et à la production d'énergie nucléaire

Dans un réacteur nucléaire, on veut pouvoir créer de l'énergie de façon continue et stable. On utilise la réaction de fission de l'uranium 235 déjà vue précédemment. Les neutrons envoyés sont capturés puis lors d'une réaction de fission, plusieurs neutrons sont alors libérés et vont pouvoir refissionner. C'est ce qu'on appelle la réaction en chaîne : il faut pouvoir contrôler cette réaction !

On introduit le coefficient de multiplication neutronique : $k > 1$: la réaction s'emballe : on veut $k=1$ pour que les réactions s'autoentretiennent.

Montrer le principe d'un réacteur et ses constituants :

- Combustible : l'uranium 235 (noyau qui va capturer un neutron)
- Modérateur : souvent c'est de l'eau : le modérateur va permettre de thermaliser les neutrons rapides issus de la fission pour les transformer en neutrons lents pour qu'ils puissent avoir une plus grande probabilité de refissionner
- Fluide caloporteur : souvent l'eau qui permet d'extraire la chaleur du cœur du réacteur
- Barre de contrôle : noyau de grande section efficace de capture de neutron qui sert à contrôler la valeur de k .

Calculer des ODG de l'énergie libérée pour 1kg d'uranium et la comparer à l'énergie libérée par 1kg de combustion du charbon

- Problème des réacteurs à fission : déchets nucléaires. Les produits de la fission sont radioactifs qui peuvent avoir des temps de vie extrêmement longs et dégagent de l'énergie. Quand on arrête le réacteur, il faut continuer à refroidir les produits de la fission, on a des émissions importantes, le temps de refroidissement est très très élevé (**1 mois après l'arrêt du réacteur, la puissance résiduelle est de 10% juste après l'arrêt ; elle même égale à 6% de la puissance nominale**).

2.3 Principe de fusion

La fusion, comme on l'a vu précédemment consiste en la somme de deux noyaux légers qui donne un seul noyau plus lourd, cela libère beaucoup d'énergie, car comme on l'a vu avec la courbe d'Aston, la pente de l'énergie de liaison par nucléon est beaucoup plus élevée que pour des atomes lourds.

Le réel intérêt de la fusion est que les éléments légers sont très abondants sur Terre et que l'on peut potentiellement libérer beaucoup d'énergie

Exemple de la réaction du deutrium et du tritium + ODG des énergies produites

On va voir dans quelles conditions peut se faire cette réaction. Pour faire fusionner deux noyaux, il faut pouvoir approcher suffisamment les noyaux, et passer la barrière coulombienne que l'on a évoqué au tout début pour le potentiel des protons. Cette barrière coulombienne est l'énergie électrostatique entre les deux noyaux. Pour les deux éléments, on a $E = Z_1 Z_2 e^2 / 4\pi \epsilon_0 r = 0.14 \text{ MeV}$.

Il faut donc aller au-delà de 10^9 K pour pouvoir passer cette barrière : c'est un des inconvénients de la fusion pour pouvoir faire en laboratoire. On peut avoir des effets tunnels, mais la probabilité est très faible et il faut atteindre des températures élevées quoi qu'il arrive. **On utilise donc l'effet tunnel avec des températures de 10^8 K ($kT = 10 \text{ keV}$)**

Cette fusion de noyaux légers a **aussi** eu lieu au cours de la nucléosynthèse primordiale et de la nucléosynthèse, c'est ce phénomène qui a permis de fabriquer les éléments jusqu'au Fer et plus, car on a des températures très très élevées au sein des étoiles et après le Big Bang

Conclusion

Ouverture sur la fusion et le projet Iter

Questions posées par l'enseignant (avec réponses)

(l'étudiant liste les questions posées, ainsi que les réponses données par l'enseignant. Si certaines réponses manquent, l'enseignant pourra compléter le document)

- Qui a découvert quand (radioactivité) ? Becquerel en premier : découverte (plaque photographique dans un local : dépôt fluorescent) / Pierre et Marie Curie en parallèle : interprétation et étude
- Pourquoi pas d'effet à l'échelle atomique de l'interaction forte ? courte portée 10^{-15} m = de l'ordre du fermi
- Valeur typique de r_0 ? $1,2 \text{ fm}$ (à spécifier dans la leçon)
- Qu'est ce vous voulez dire par là en disant que le problème à A corps est insoluble ? pas de solutions analytiques **pour $A > 4$** d'où l'idée de faire des approximations ou alors le faire numériquement
- Rappeler ce qu'est 1 MeV ? $1 \text{ MeV} = 1 \cdot 10^6 \text{ eV}$

- Quelle différence entre B ou B/A ? B proportionnelle au nombre de nucléons donc plus le nombre de nucléon augmente plus B augmente. Il faut pouvoir comparer l'énergie de liaison pour chaque noyau indépendamment du nombre de nucléon. B/A est l'énergie de liaison par nucléon.
- Interaction forte attractive ou répulsive ? à très courte portée (en dessous du fermi) elle est répulsive et puis à l'échelle du noyau elle est attractive.
- Pourquoi le nucléon interagit juste avec ses plus proches voisins ? en réalité il interagit avec tous vu que son parcours moyen est de l'ordre du noyau mais dans le modèle de la goutte liquide les nucléons sont très proches donc peuvent peu bouger
- Terme Coulombien dans le modèle de la goutte liquide : on peut expliquer ce terme en électrostatique ? un proton voit une charge de $Z-1$: énergie entre ce proton et tout le reste du noyau. *Il vaut mieux le dériver à partir d'une sphère uniformément chargée.*
- Les noyaux sont stables quand ils ont autant de neutrons que de protons ? quand on a des noyaux lourds l'interaction coulombienne devient plus élevée donc on ne suit plus la droite $Z=N$ pour des noyaux stables : excès de neutrons pour les noyaux lourds.
- Est-ce qu'un neutron c'est stable ? tout seul il se désintègre par interaction faible : écrire la réaction : $n \rightarrow p + e^- + \text{antineutrino}$. Au sein d'un noyau, il peut être stable ou pas. Qu'est ce qui fait qu'il est stable ou qu'il se désintègre ? Potentiel de WS : si $E_F \text{ proton} < E_F \text{ neutron}$ il y a possibilité de désintégration en proton.
- Qu'est ce que vous appelez stabilité particulière ? il y a des pics sur la courbe d'Aston (non prévu par la théorie) : **Noyaux magiques** : énergie de liaison particulièrement élevée. Ce n'est pas spécialement lié à leur stabilité ? lié à leur cohésion plutôt / plus liés et difficiles à exciter : vous pouvez l'expliquer ? niveau d'énergie éloigné il faut fournir beaucoup d'énergie et il y a une petite probabilité d'excitation
- Montrer ce qu'on entend par couches / sous couches sur le schéma de WS ? Pourquoi levée des dégénérescences ? couplage spin orbites.
- L'uranium 235 est un noyau sphérique ? ellipse (parce que la définition de la fission donnée est le passe d'un noyau sphérique à deux noyaux sphériques). Du coup même si le noyau est déjà déformé il se déforme encore plus au cours de la fission
- Pourquoi la fission spontanée ne concerne que les noyaux lourds ? avec le modèle de la goutte liquide déformable on peut le montrer : lié à la compétition entre le terme de surface et le terme coulombien : faire le ratio : Z^2/A . Le terme coulombien gagne pour pouvoir séparer les noyaux donc il faut $Z^2/A > 30$: vrai pour les noyaux lourds / ne se vérifie pas pour les noyaux légers.
- Comment on explique l'existence de la barrière : on aurait dit que pour les protons c'est plus dur d'être expulsé alors qu'ils se repoussent ? Pourquoi il faut donner plus d'énergie pour extraire un proton que pour un neutron ? dessiner la forme du potentiel (champ moyen total coulombien + potentiel nucléaire) : réduire la barrière coulombienne
- Q de réaction de la fission est de 200MeV : retrouver cet ODG ? on considère une fission symétrique on sait qu'on a par nucléon 0,9MeV de libéré puis on multiplie par le nombre de nucléons
- Pourquoi la fission spontanée est impropre à produire de l'énergie nucléaire ? la période de désintégration est extrêmement grande : plusieurs ODG en années !
- Fission induite est ce qu'on peut la faire avec des protons ? il y aurait la barrière coulombienne à passer / il faudrait qu'il ait une énergie de l'ordre de la barrière : ODG ? quelques centaines de keV si léger et quelques dizaines de MeV si noyau lourd
- Caractériser les ODG neutrons lents et rapides ? lent = thermique : vitesse 2km/s de l'ordre du MeV / rapide ?

- ODG entre les probabilités de capture entre les deux neutrons ? neutron rapide à 100 fois moins de chance de se faire capturer qu'un neutron lent
- Que ce passe-t-il si $k > 1$? on pourrait induire beaucoup de réaction de fission : Tchernobyl : le réacteur s'emballe : forte chaleur et pression : rupture du réacteur mais pas d'explosion nucléaire. Il y a eu une fusion (au sens chimique) des matériaux de protection.
- Comment fonctionne un modérateur ? transfert d'énergie cinétique par chocs élastiques entre les neutrons et les noyaux des molécules d'eau : ralentir les neutrons. On veut qu'il y ait un gros transfert d'énergie cinétique il faut que le modérateur soit léger
- Qu'est-ce qui se passe si le modérateur capture trop de neutrons ? enrichir en matière fissile
- Caloporteur : est-ce que c'est toujours de l'eau ? graphite / sodium
- Avantage à utiliser de l'eau par rapport au graphite ? si le réacteur s'emballe la température augmente : l'eau passe en premier sous forme gazeuse donc ne peut plus jouer le rôle de modérateur donc le réacteur arrête de s'emballer (contrairement au graphite)
- Principe de la barre de contrôle ? noyaux qui peuvent capturer des neutrons facilement (Cd)
- Fusion : comment on trouve le deutérium et le tritium ? deutérium dans les océans / on peut fabriquer du tritium à partir du lithium
- Pas vraiment de défauts au réacteur par fission ? les produits de fission sont radioactifs donc ils dégagent de l'énergie pendant des milliers d'années : il faut les refroidir (c'est une question de puissance dégagée : quand on coupe ça représente 6% de la puissance nominale du réacteur puis ça décroît assez vite) / stocker les déchets / ressource pas inépuisables

Commentaires lors de la correction de la leçon

(l'étudiant note les commentaires relatifs au contenu de la leçon : niveau, sujets abordés, enchaînement, réponses aux questions, etc. L'enseignant relit, et rectifie si besoin)

- Bon plan

- Eviter de terminer en 5 min par la fusion car on n'en dit pas assez : peut-être couper encore la première partie quand on regarde les couches de Fermi / modèle en couche (les garder pour les questions : niveau de Fermi limite au niveau L3) mais garder le modèle de la goutte liquide et les nombres magiques.
- Parler du fermi
- Attention au tableau avec les interactions (ne pas forcément montrer le tableau)
- Apparier et pas appareiller
- Bonne introduction des nombres magiques (courbe Aston)
- Donner ODG neutrons rapides et lents
- Pour les neutrons rapides : la probabilité de capture menant à une fission est petite mais pas la probabilité de capture en général
- Attention quand on présente le réacteur : montrer juste cette partie pour ne pas avoir de questions sur le reste du dispositif
- Bonne idée pour le calcul de l'énergie à comparer au charbon
- Parler plus de la fusion : différents types de fusion (naturelle dans les étoiles, contrôlée) / ODG valeur de B/A et la comparer à celle de la fission
- Ou prendre le parti d'enlever la fusion

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. Attention à utiliser un vocabulaire aussi précis que possible et donner des ordres de grandeur, notamment pour donner de l'épaisseur aux parties fission et 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