

LP : Stabilité du noyau

Charles Goulas

20 avril 2021

Contents

1	Plan	1
1.1	Modèle nucléaire	1
1.1.1	Énergie de liaison	1
1.1.2	Modèle de la goutte liquide	2
1.1.3	Paraboles de masse	2
1.2	Désintégrations radioactives	2
1.2.1	Différents modes de désintégration	2
1.2.2	Période radioactive	2
1.2.3	Nucléosynthèse	2
2	Questions	3
3	Commentaires	3

1 Plan

Introduction : Photo du nouveau sarcophage de la centrale de Tchernobyl. Pourquoi a-t-on encore besoin de se protéger des ruines 30 ans après l'accident ? Parce que certains atomes produits lors des réactions nucléaires continuent de se désintégrer, sur des temps caractéristiques de plusieurs décennies. Aujourd'hui on va étudier ces phénomènes de désintégration. Pour cela on va d'abord avoir besoin d'un modèle nucléaire.

1.1 Modèle nucléaire

1.1.1 Énergie de liaison

[Frédéric Mayet, Physique nucléaire appliquée, chapitre 1]

Définition de l'énergie de liaison, courbe de l'énergie moyenne par nucléon B/A en fonction de A .

Ordres de grandeur : $B/A \sim 8$ MeV pour $Z \geq 3$, 1 g de fer a une énergie de liaison de $10^{12}J$, soit une grosse bombe atomique.

Transition : La courbe B/A va nous aider à construire un modèle physique de l'énergie de liaison d'un noyau.

1.1.2 Modèle de la goutte liquide

[Frédéric Mayet, Physique nucléaire appliquée, chapitre 2]

Construction du modèle de la goutte liquide pas à pas, avec le code python qui permet d'ajouter les termes un par un.

1.1.3 Paraboles de masse

[Frédéric Mayet, Physique nucléaire appliquée, chapitre 5]

On fixe le nombre de nucléon A , la masse nucléaire $m(Z)$ forme alors une parabole. On voit alors quels atomes à nombre de nucléons fixés sont les plus stables.

Transition : Comment on descend la parabole pour stabiliser les noyaux ? Par des désintégrations radioactives !

1.2 Désintégrations radioactives

1.2.1 Différents modes de désintégration

[Frédéric Mayet, Physique nucléaire appliquée, chapitre 5]

Désintégration β^+ et β^- . On montre que ça permet de descendre les paraboles de masse et donc de stabiliser les noyaux.

Autre désintégration courante : la désintégration α .

Slide : vallée de la stabilité. On retrouve les trois désintégrations qu'on vient de voir.

Transition : on avait dit au début de la leçon que certains noyaux mettaient du temps avant de se désintégrer. Pour quantifier ça, on introduit la période radioactive.

1.2.2 Période radioactive

[Frédéric Mayet, Physique nucléaire appliquée, chapitre 1]

Loi de désintégration, période radioactive. Ordres de grandeur très variés : 2 min pour le bismuth 211, 30 ans pour le césium 137 (déchet radioactif), 4,5 Ga pour l'uranium 238.

Application : datation radiométrique du système solaire grâce deux séries radioactives de l'uranium 238 et 235. Explications ici.

Transition : D'après la courbe B/A , fusionner des noyaux légers augmente l'énergie de liaison par nucléon donc doit aboutir à une structure plus stable. Comme forme-t-on des éléments de nombre de nucléon supérieur à 60 (à peu près le maximum de la courbe) ?

1.2.3 Nucléosynthèse

[Luc Valentin, le monde subatomique, chapitre 8][Basdevant, énergie nucléaire, chapitre 9]

La fusion de noyaux légers est souvent exo-énergétique, exemple du deutérium + tritium (fusion nucléaire contrôlée) et des 4p en hélium 4 (fusion de l'hydrogène dans les étoiles).

Les noyaux lourds, à $A > 60$, se forment lors de l'explosion d'étoiles en fin de vie, par capture de neutron (phénomène très rapide, se fait en quelques secondes), puis par des désintégrations radioactives.

Vidéo résumant cette nucléosynthèse ici, à partir de 8:48 (on peut montrer quelques images à partir de 7:30 pour voir aussi la fusion).

2 Questions

Comment mesure-t-on la masse d'isotopes nucléaires ? Spectroscopie de masse

Comment sait-on qu'il fallait un anti-neutrino, ou du moins une nouvelle particule, dans la désintégration β^- ? La distribution d'énergie de l'électron émis n'est pas piquée sur une valeur d'énergie mais continue, il faut une troisième particule dans le bilan pour expliquer cela.

Si on met un neutron dans le vide, qu'est-ce qui se passe ? Il se désintègre, demi-vie de 880 secondes.

Quelle interaction explique la désintégration β ? l'interaction faible. C'est quoi ? bonne question.

Quelle interaction explique la cohésion du noyau ? L'interaction forte explique la cohésion des quarks dans les nucléons, puis ceux-ci interagissent pour former le noyau, comme des dipôles interagiraient par interaction de Van der Waals pour former des liquides / des solides moléculaires. C'est quoi l'interaction forte ?

Impact de la radioactivité en géologie ? 80 % de l'énergie provenant du sol provient de la radioactivité. Il n'y aurait pas de tectonique des plaques sans elle.

Comment on a découvert le proton ? le neutron ?

Neutrons pas stables seuls, ni dans un noyau qui contiendrait que des neutrons. Pourquoi une étoile à neutron est stable ? La pression y est assez élevée pour favoriser la forme "neutron" plutôt que la forme "proton + électron".

Il manque quoi dans le modèle de la goutte liquide ? L'aspect quantique. Ça pourrait être pas mal de conclure la-dessus.

Les étoiles sont le seul endroit où il y a de la nucléosynthèse ? Non, il y aussi la nucléosynthèse primordiale dans les 15 premières minutes de l'univers, qui a produit de l'hydrogène, de l'hélium et un peu de lithium.

3 Commentaires

Telle quelle la leçon a un niveau terminale. Pour élever le niveau de la leçon, le correcteur propose :

- faire un modèle quantique de désintégration pour retrouver les périodes radioactives. Par exemple le modèle de Gamow de la radioactivité alpha, qu'on a fait en méca q, et qui est fait aussi dans le Basdevant, énergie nucléaire, page 87
- un modèle de fission nucléaire à partir de la goutte liquide, fait dans le Krane, introductory to nuclear physics, dispo ici, pages 482-483

- parler un peu d'interaction forte qui permet la cohésion des quarks par les gluons, puis des protons et des neutrons dans le noyau
- présenter en fin de leçon le modèle en couche (écrire l'hamiltonien, parler des nombres magiques, etc). D'après le correcteur, parler du modèle en couche est important.

A un moment dans la leçon il faut insister sur la stabilité remarquable des noyaux, alors que le truc est pas sensé être stable si on prend juste en compte les interactions gravitationnelles / électrostatiques. Un ordre de grandeur de l'énergie potentielle électrostatique des protons dans le noyau peut-être fait, notamment au moment de l'introduction du terme coulombien dans le modèle de la goutte liquide.

Ça peut être bien de parler de la fission.

Ne pas balancer direct la formule de Bethe-Weizsäcker puis expliquer l'origine de chacun des termes, mais introduire chaque terme l'un après l'autre pour construire la formule pas à pas.

Attention à la slide sur la vallée de la stabilité, certaines couleurs de la légendes on n'en a pas parlé dans la leçon, et le rose on sait pas ce que c'est.

On voit souvent le fer 56 comment élément le plus stable sur la courbe B/A , mais c'est le nickel 62 en réalité. Pour pas de confusion, évoquer simplement un maximum de stabilité autour de $A = 60$.

Les bons points : le code python apporte une vraie plus value, la partie sur la nucléosynthèse est bien et originale.