

LP41 : FUSION, FISSION (L3)

Prérequis

- énergie chimique
- classification périodique
- équivalence masse/énergie
- notion de physique atomique

Idées directrices à faire passer

- Le noyau est un état lié et possède donc une énergie de liaison que l'on peut exploiter par des transformations nucléaires conduisant à un noyau plus stable
- Les modèles de noyaux sont surtout phénoménologiques (il n'y a pas de théorie solide)
- analogie avec les réactions chimiques mais à des énergies bien plus élevées

Commentaires du jury

- l'exposé doit rester quantitatif, il ne peut être une somme de faits attractifs
- le modèle de la goutte liquide est au centre de l'explication de la stabilité nucléaire : on ne peut en faire l'économie
- les techniques expérimentales doivent être maîtrisées
- maîtriser les principales caractéristiques du noyau : taille, énergie, structure interne...

Bibliographie

- [1] Énergie nucléaire, Basdevant, Editions de l'école Polytechnique
- [2] Physique moderne, Thornton & Rex, De Boeck

Introduction De Boeck, complément chap.13. Présenter la mise en évidence de la première réaction de fission nucléaire (réalisée par Hahn et interprétée par Meitner) et l'effervescence qui s'en suivit. Indiquer tout de suite l'ODG de l'énergie libérée à comparer aux énergies de combustion chimique. Le rôle de cette leçon sera entre autre d'expliquer la nature de ces énergies.

I Quelques éléments de physique nucléaire

1 Constitution de l'atome : rappel [2]

- recopier tableau 12.1, chap 12 de Boeck donnant les caractéristiques des constituants élémentaires. Introduire u , énergie de masse atomique
- introduire et expliciter la notation A_ZX
- ODG de la densité du noyau + ODG de l'énergie d'interaction coulombienne -> mais alors pourquoi le noyau n'explose pas ?

2 Force d'interaction [2]

2.1 Présentation des forces élémentaires

- recopier figure 14.5 et tableau 14.1, chap.14 De Boeck -> présente l'ensemble des interactions fondamentales
- conclure au regard de la portée et de l'intensité des interactions, que pour le noyau, on peut se contenter des interactions fortes et EM

2.2 Interaction forte

chap. 12 -> force nucléaire. présenter les diagrammes de potentiels p-p et n-p obtenus par diffusion élastique. 2 conclusions

- la résultante est stabilisante à courte distance $E < 0$ -> interaction forte
- à longue portée, il ne reste que la composante EM déstabilisante

3 Energie de liaison / défaut de masse [1]

- on constate expérimentalement que la masse du produit est différente de celle des constituants élémentaires
- on y associe une énergie de liaison (par équivalence masse énergie) puisque c'est l'énergie à apporter pour le séparer en ses constituants
- l'énergie de liaison tient compte de l'énergie cinétique des nucléons dans le référentiel du centre de masse et de l'énergie potentielle d'interaction (forte et EM)
- ODG pour ${}^4\text{He}$ -> à comparer à 13,6 eV
- pour un édifice stable, cette énergie de liaison doit être positive

4 Modèle de la goutte liquide [2]

chap.12 de Boeck

- modèle proposé par Bohr : par analogie avec stabilité d'une goutte liquide pour l'atome : interaction interparticules stabilisantes, l'absence d'interaction en surface pouvant alors être modélisée par une énergie de surface déstabilisante
- conduit à la formule semi-empirique de Von Weizsäcker donnant l'énergie de liaison. bien expliquer tous les termes

5 Courbe d'Aston [2]

- on utilise la formule de Von Weizsäcker pour tracer l'énergie de liaison par nucléon fonction du nombre de nucléons
- constater un max de stabilité autour du fer. la matière devrait donc tendre vers ce puits d'énergie
- MAIS, par analogie avec la barrière d'activation chimique, les réactions nucléaires (spontanées) présentent une certaine cinétique, ce qui explique que l'on ne trouve pas que du Fe
- on ne parlera pas ici des processus spontanés (radioactivité)
- on s'intéressera par la suite uniquement aux processus de fusion et de fission

II Fission

1 Origine de la fission, fission spontanée [2]

- utiliser le modèle de la goutte liquide : à reprendre et expliquer que déformation du noyau se fait à énergie coulombienne constante et énergie d'interaction forte décroissante. -> augmentation temporaire de l'énergie (barrière potentiel)
- puis fission avec énergie coulombienne qui chute et quasi conservation de l'énergie d'interaction forte
- la fission spontanée explique : inexistence d'éléments transuraniens subissant une fission spontanée très rapide ; existence de noyaux lourds (fission spontanée par franchissement tunnel possible mais très lente (phénomène marginal devant les autres radioactivités))

2 Fission induite [2]

- présentation de la réaction
- expliquer l'effet de la capture d'un neutron
- intérêt des neutrons thermiques : discussion sur la section efficace (variant en $1/v$)
- ODG de l'énergie libérée par la réaction (comparée au charbon)
- possibilité de réactions en chaîne (introduire le concept de criticité)

3 Architecture d'un réacteur [2]

- coeur : importance du modérateur sur la criticité + barre de contrôle
- architecture globale : centrale thermique classique

III Fusion

1 Principe [2]

- fusion de 2 noyaux légers, là encore interpréter le gain en énergie par la formule de Von Weizsäcker

- faire un ODG de l'énergie produite
- réaction difficile à amorcer : nécessité de vaincre la barrière électrostatique pour approcher les deux noyaux

2 Fusion naturelle [2]

- présenter la nucléosynthèse solaire
- elle explique la formation des éléments lourds jusqu'au fer à partir de l'hydrogène (constituant de base de l'univers après la nucléosynthèse primordiale)
- présenter le cycle CNO et proton-proton
- décrire le cycle proton-proton et évaluer l'énergie totale libérée par une réaction
- c'est la source d'énergie des étoiles !

3 La fusion sur Terre [1]

- introduire et expliquer le critère de Lawson.
- présenter l'évolution des machines
- présenter le principe du confinement magnétique
- insister sur les difficultés à maintenir un long temps de confinement
- ITER : convergence de toutes les meilleures caractéristiques mondiales (temps de confinement (Tore Supra), puissance (JET), contrôle de forme (TCV))

Conclusion :

- Bilan des éléments importants de la leçon : seul le fer est stable. Mais il existe une barrière d'énergie qu'il faut vaincre pour enclencher une réaction exoénergétique amenant à l'élément le plus stable ; les ODG d'énergie mises en jeu sont colossaux (par rapport à l'énergie chimique usuelle)
- ouvrir sur les différents enjeux de l'énergie nucléaire pour la société (non prolifération des armes nucléaires, utilisation de la fission en centrale en minimisant les risques et en assurant une gestion pérenne des déchets, les enjeux de la maîtrise de la fusion comme réponse viable aux problèmes de l'énergie fossile (ressource et pollution))

Q/R

1. Comment détecter l'existence d'isotopes ?
2. Comment mesure-t-on le spin nucléaire ?
3. Comment tester et prouver l'invariance de charge de l'interaction forte ?
4. Définir la notion de section efficace.
5. Pourquoi l'He(II) n'existe pas ?
6. Pourquoi le neutron est stable dans le noyau et instable à l'extérieur ?
7. Pourquoi le noyau n'est-il pas fait de protons et d'électrons comme on le croyait en 1900 ?
8. Comment expliquer la différence d'ODG énergétique entre énergie chimique et nucléaire ?
9. Portée des forces nucléaires
10. Pourquoi le proton et le neutron ont-ils même masse ?
11. Quelles sont les particules médiatrices des différentes interactions ?
11. Quelles sont les particules médiatrices des différentes interactions ?
12. Equation des réactions dans le Soleil
11. Qu'est-ce que la radioactivité ?