

LP 40 : Fusion, fission

PFISTER Hugo, MICHEL Thibault

Niveau : L3

Prérequis : Energie de masse, tension de surface, interactions fondamentales, radioactivité.

Bibliographie :

Physique subatomique, noyaux et particules, Luc Valentin

Le nucléaire expliqué par des physiciens, Bonche

La première référence est très utile pour les deux premières parties (physique sous-jacente), la deuxième plus utile pour les deux dernières parties (aspects industriels et pratiques).

Intro : Au début du XX^{ème} siècle, on comprend qu'il existe une énergie liée à la masse d'une particule grâce à Einstein. La Seconde Guerre Mondiale nous le fait découvrir en pratique, à Hiroshima et Nagasaki. Aujourd'hui, tout est mis en œuvre pour changer le mode de production d'énergie, en arrêtant l'énergie fossile. On va voir comment « capter » cette énergie de masse, qui vient du noyau atomique (d'où le terme nucléaire), et les différentes méthodes de le faire. C'est important de comprendre les mécanismes mis en jeu, pour éviter notamment des catastrophes comme Fukushima ou Tchernobyl.

I. Le noyau atomique

1) Historique

Rappels historiques sur les dates et la façon dont a découvert la constitution de l'atome: l'électron, le noyau (exp de Rutherford) et le neutron (Chadwick)

2) Constitution du noyau

Petit tableau où on regroupe les propriétés des constituants de l'atome : masse, charge, et introduction des unités utilisées (fermi et MeV). Schéma de l'atome. Insister sur le fait que le noyau est très petit devant l'atome, mais beaucoup plus lourd.

3) Les interactions fondamentales

Dire que 2 ont été étudiées en cours (Gravitation et Coulombienne), mais ces deux forces n'expliquent pas la stabilité du noyau (On peut faire un ODG pour voir que pour 2 protons, la gravité est très négligeable devant l'interaction électrostatique). On introduit donc une force, dite **interaction forte**, qui ne peut agir qu'à très courte distance (sinon, on la verrait à notre échelle), et qui explique cette stabilité.

On peut insérer un tableau descriptif de ces 3 forces, et même y inclure l'interaction faible. Comparer l'intensité et la portée de ces interactions.

On voit que l'interaction forte est la plus intense, il est donc logique d'essayer de récupérer l'énergie qui en découle, on va voir comment.

4) Défaut d'énergie et stabilité

Expérimentalement, on constate que la somme des masses des constituants d'un noyau est plus grande que la masse totale du noyau en question. C'est assez logique et cette masse plus faible correspond à une énergie plus faible, d'où la stabilité du noyau. Ce n'est donc pas le cas pour les noyaux instables.

Cette différence d'énergie est nommée défaut d'énergie, notée $B(A,Z)$. Plus elle est grande, plus le noyau est stable. C'est la différence de défaut d'énergie pour les différents noyaux qu'on exploite pour récupérer l'énergie « nucléaire ».

A ce stade, on peut présenter un transparent sur la vallée de la stabilité.

II. Le modèle de la goutte liquide

1) Constatation expérimentale

Montrer le graphe donnant $B(A,Z)/A$, ayant un maximum pour l'atome de fer, et illustrer que le passage de gauche à droite, c'est la fusion, et de droite à gauche, c'est la fission.

2) Formule de Bethe-Weizsacker

Expliquer pourquoi on assimile le noyau à une goutte liquide, présenter les hypothèses, puis présentation terme par terme de la formule.

3) Comparaison à l'expérience

Courbe où on superpose les données expérimentales et une approximation par cette formule. On peut donner la valeur des coefficients correspondant à chaque terme énergétique.

III. La fission nucléaire

1) Ordre de grandeur

ODG pour savoir combien de MeV rapporte une fusion d'un atome d'uranium (en s'appuyant sur le II). Voir ce que ça représente

pour 1g d'uranium, et comparaison à la combustion du pétrole. C'est vraiment pas mal.

2) Mécanisme

Mécanisme où l'on bombarde un neutron sur de l'U(235), devenant U(236) excité, qui lui-même fissionne en atomes plus petit. B/A augmente, et donc on récupère de l'énergie. On peut aussi expliquer que cette étape génère des neutrons lents, qui pourront aussi entrer en collision avec d'autres U(235) : c'est l'emballement, et une énergie immense libérée en peu de temps (bombe). Dans une centrale, on veut éviter ça, d'où :

3) Mise en pratique

Deux niveaux d'explication : le cœur nucléaire avec des barres de contrôles qui captent les neutrons en trop, avec toute la sécurité mise en œuvre. Ensuite, le niveau plus global, qui permet de transformer l'énergie cinétique récupérée en énergie électrique (schéma global d'une centrale). Il en explique plusieurs types, ce qu'on peut mentionner.

Il existe cependant bien des inconvénients à ce mode de fonctionnement : risque d'emballement, déchets radioactifs, et combustible pas infini. Il est donc nécessaire de développer autre chose.

IV. La fusion

1) Avantages par rapport à la fission

- Les réactifs sont abondants
- Pas de risque d'emballement
- Pas de déchet (produit = Hélium)
- Une réaction produit plus d'énergie

2) Conditions nécessaires

On peut faire un calcul d'ODG pour trouver la température nécessaire pour approcher 2 protons à 100 fm : environ 10^6 K. Il faudra donc un gaz très chaud.

De plus, cette agitation thermique sera nécessaire pour avoir suffisamment de collision par unité de temps entre Deutérium et Tritium.

Ensuite, il faut avoir un plasma, car sinon on aura une diffusion entre atomes, les électrons jouant un rôle.

Enfin, il faut une densité de particules assez importante.

Il faut aussi réunir ces conditions pendant assez longtemps pour pouvoir récupérer de l'énergie. Deux techniques principales sont utilisées pour réunir tout cela :

- Le confinement inertiel (on augmente le plus possible la densité du plasma).
- Le confinement magnétique (on se permet d'avoir de très hautes températures, le plasma étant confiné magnétiquement) : c'est le projet ITER.

3) Le projet ITER

Photos disponibles en transparent. Des champs de 4T sont mis en œuvre sur une surface de plusieurs m^2 . Pour l'instant, l'énergie mise en œuvre pour obtenir ces champs, ce confinement et ces températures est bien plus importante que celle récupérée. A terme, l'idée est d'en récupérer plus, voire même suffisamment pour « auto-générer » les conditions nécessaires, comme dans le Soleil.

Conclusion :

La connaissance de la structure de l'atome et des interactions mises en jeu au sein du noyau a permis de prévoir une nouvelle source d'énergie. Les énergies mises en jeu étant gigantesque, il convient de les maîtriser grâce à une technologie complexe mais nécessaire. Aujourd'hui, la fission présentant beaucoup d'inconvénients, il devient primordial de tout mettre en œuvre pour exploiter la fusion nucléaire.

Questions :

-Comment a été découvert le noyau ?

Retour sur l'expérience de Rutherford, et se rappeler qu'il y avait 2 modèles possibles à l'époque (le deuxième étant que les charges + étaient réparties uniformément dans tout l'atome)

-Comment expliquer la stabilité/instabilité de tel ou tel atome ? Pourquoi on sort, pour de « gros » noyaux, de la droite $N=Z$?

Au début, il s'agit des termes quantiques qui prédominent et donnent $N=Z$. Ensuite, il faut minimiser l'énergie coulombienne en maximisant l'interaction forte (ce qui fait augmenter le rapport N/Z). Ensuite, si le noyau devient trop gros, l'interaction forte ayant une portée limitée, on perd complètement cet effet attracteur, alors que l'énergie Coulombienne reste présente : le noyau est instable.

- Pourquoi le terme en Z^2 dans BW, et pas en $Z(Z-1)$?

En fait, le $Z(Z-1)$ peut sembler logique : on retrouve 0 pour $Z=1$ (ce qui est logique), et on peut voir ça comme Z protons interagissant

chacun avec $Z-1$ autre. Il semble que le calcul exact donne Z^2 (sauf si $Z=1$ bien sûr), mais ça a de toute façon peu d'importance pour Z grand...

- Les coefficients numériques devant chaque terme dans BW sont ils théoriques ou expérimentaux ?

Quasiment tous expérimentaux (à part le terme Coulombien où il existe des modèles). Cela explique en partie pourquoi cette formule coïncide si bien avec les résultats expérimentaux.

Remarques :

- La première partie est indispensable. Il ne faut pas hésiter à donner pas mal d'ordres de grandeur, c'est apprécié.
- On a ici présenté le modèle de la goutte liquide : c'est un modèle où il y a pas mal de physique, et qui permet de comprendre « avec les mains » un peu mieux la stabilité ou non d'un noyau. Cependant, le modèle quantique dit « modèle en couche » fournit de meilleurs résultats (notamment sur l'existence des nombres magiques), mais est nettement plus compliqué. C'est très mathématique et peut-être assez risqué de le présenter en détail. On peut simplement le mentionner en disant qu'il existe et qu'une théorie quantique marche bien et explique d'autres phénomènes.
- Si on présente le modèle de la goutte liquide, il faut bien se l'être approprié : les termes quantiques notamment ne sont pas évidents à comprendre au premier abord.
- Les aspects techniques sur la fission sont également assez importants, mais bien expliqué dans la biblio.
- Leçon où l'on peut faire plein d'ordres de grandeurs, il ne faut donc pas hésiter.