

Bonjour, dans cette leçon nous allons nous intéresser aux réactions nucléaire de fusion et de fission.

Pour cela nous aurons besoin en prérequis de notions en :

- électromagnétique
- mécanique quantique
-

On se place à un niveau de deuxième année de Licences.

Les débuts de la physique nucléaire commencent avec la découverte de la radioactivité Becquerel 1896

Est ensuite venue l'année suivante la découverte de l'électron : Thomson 1897 et du noyau Rutherford 1911

Cela nous a permis de donner un modèle de l'atome composé d'un noyau de protons et neutrons avec des électrons en périphérie, que l'on symbolise par

Diazo

Les découvertes se continuent jusqu'à nos jours, on retrouve la physique nucléaire en astrophysique pour expliquer l'énergie des étoiles et dans de nombreuses applications comme la production d'électricité dans les centrales

Son étude a donc un intérêt fondamental et pratique.

On peut tracer une carte des noyaux et on observe une vallée de stabilité Diazo.

On va, ayant de s'intéresser à la fusion et la fission ~~enfage~~, essayer de comprendre cette stabilité.

Les investissements pour utiliser cette source d'énergie sont énormes.
De plus, la fusion nucléaire ne produit pas de déchets radioactifs
contrairement à la fission nucléaire.

Nous avons abordé la nucleosynthèse ~~prim~~ stellaire c'est aussi
la nucleosynthèse qui s'est produite aux premiers instants de l'univers
et qui a permis de nucleosynthèse primordial.

Les modèles prédicent une abondance primordiale en éléments
légers comme l'hydrogène, le deutérium et l'hélium et bonnes
accord avec les observations.

1- Stabilité de l'atome:

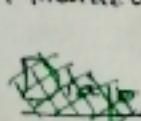
1-1- Interaction forte:

On a donc vu le modèle de l'atome mais si ce stade rien ne nous permet de comprendre sa stabilité. Effectivement, le noyau étant constitué de neutrons de charges électriques nulles et de protons de charges électriques positives ces derniers, de part l'interaction coulombienne devrait se repousser et le noyau éclater.

Il existe donc une interaction autre qui maintient les nucléons.

On connaît l'interaction gravitationnelle, on sait que c'est une interaction de faible intensité qui domine à grande échelle.

Pour donner une idée on peut donner des ordres de grandeur en comparaison à l'interaction coulombienne pour les protons du noyau:



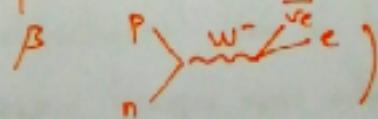
taille noyau $d \sim 10^{-15} \text{ m}$

$$\rightarrow \text{répulsion coulombienne entre protons: } F = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 d^2} \sim 230 \text{ N}$$

$$\rightarrow \text{attraction gravitationnelle: } F = G \frac{m p^2}{d^2} \sim 2 \cdot 10^{-34} \text{ N}$$

Par expliquer la stabilité de l'atome il doit exister une autre interaction fondamentale.

En fait, elles sont deux: - l'interaction faible que l'on ne développera pas ici (option: elle est responsable de la radioactivité)



- et l'interaction forte.

L'interaction forte assure la cohésion des quarks qui sont des particules élémentaires, mis en évidence ~~vers 1930~~ en 1933 et qui constituent les nucléons

Diapo

--- 10.10

à cette interaction à une intensité non nulle dans le voisinage des nucléons, il existe alors une force que l'on appelle souvent force nucléaire forte résiduelle on peut représenter son potentiel: (option: potentiel Yukawa: $V = g \frac{t_0}{r} e^{-rt_0}$)

Diapo

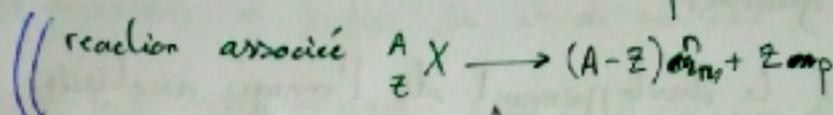
à des distances typiques de l'ordre de 1,3 fm la force est très intense elle peut vaincre la répulsion coulombienne. Elle s'oppose plus proche voisin et est répulsive à très faible distance du fait de la non interénétration.

{ Nous avons vu pourquoi les noyaux étaient stables, mais pour quantifier cette stabilité on peut s'intéresser à l'énergie de liaison

1-2- Energie de liaison

On définit l'énergie de liaison:

Diapo def: énergie à fournir pour séparer un noyau atomique ${}^A_Z X$ immobile en ses nucléons séparés immobiles



Rmq: on note une réaction de la même façon que l'on noterait une réaction chimique.

On peut faire un bilan énergétique, l'énergie lors de la réaction est conservée et des particules sont aux repos, on prend en compte l'énergie de masse:

$$m_X c^2 + E_e(A, Z) = (A-Z)m_n c^2 + Z m_p c^2$$

$$\Leftrightarrow E_e(A, Z) = [(A-Z)m_n c^2 + Z m_p c^2] - m_X c^2 \hat{=} \text{défaut de masse } \Delta m c^2$$

un noyau est stable si $E_e > 0$ il est préférable d'un point de vue énergétique que les nucléons s'assemblent.

On a dans l'expression une différence d'énergie de masse, on parle alors aussi de défaut de masse.

Etant donné que cette énergie est directement liée à la stabilité du noyau, c'est elle qui va nous intéresser lorsque nous allons étudier les réactions nucléaires.

On peut regarder l'énergie de liaison de quelques atomes

<u>Diapo</u>	${}^2_1 H$	2,22 MeV	${}^{38}_{18} Ar$	1801 MeV
	${}^{16}_8 O$	127,6 MeV		

Bien étudier l'énergie de liaison augmente avec le nb de nuclions.

On a affaire ici à des énergies collatérales, pour donner une idée la combustion d'un atome de carbone dégage 6 eV

Si on considère 1000 tonnes de charbon cela correspond à un défaut de masse de 0,53 grammes.

On comprend alors le développement de l'énergie nucléaire.

Rmq: l'énergie de liaison associée à l'électron & de l'atome est toujours très faible devant l'énergie de liaison et on l'a négligé (ex Hydrogène : 13,6 eV)

Nous avons vu un critère de stabilité d'un noyau mais cela ne nous indique pas si un atome peut être plus stable qu'un autre.
Or cela doit être le cas si il existe des réactions nucléaires.
On s'intéresse à la courbe d'Aston

LP42

FUSION, FISSION

R ④

1-3- Courbe d'Aston:

Diapo courbe (Aston prix nobel)

On ne s'intéresse non plus à l'énergie de liaison totale mais à cette énergie par nombre de nucléon, en fonction du nb de nucléons.

On observe que cette énergie augmente jusqu'à $A \approx 50$, ce qui correspond au fer pour ensuite diminuer petit à petit, l'énergie de liaison par nucléon est alors de l'ordre de 8 MeV pour une grande partie des atomes.

Les atomes sont plus stables près du fer

Option (sur diapo)

on peut essayer de comprendre l'allure de cette courbe en modélisant plusieurs composante énergétique.

$$E_c(A, Z) = E_v +$$

E_v : énergie de volume
plus il y a de nucléons plus l'énergie de liaison est importante

$$= a_v A$$

$$E_c(A, Z) = E_v + E_s$$

E_s : énergie de surface

analogie avec goutte liquide, plus les nucléons à la surface du noyau sont en contact avec moins de nucléons que ceux du centre l'énergie de liaison est diminuée

$$= -a_s A^{2/3}$$

$$E_c(A, Z) = E_v + E_s + E_c$$

E_c : réulsion électrostatisique.

provoqué des protons chargés positivement qui se repoussent
on considère que le noyau est une sphère chargée positivement uniformément

$$= -a_c Z^2 A^{-1/3}$$

par compenser, à grand Z , cela favorise un excès de neutrons pour compenser par inertie, ce qui l'on observe sur la table de stabilité.

" existe ensuite deux termes d'origine quantique

$$E_c(A, \gamma) = E_v + E_s + E_c + E_a$$

E_a : énergie d'asymétrie

favorise la symétrie $Z=N$ observée

$$= -\alpha_a \frac{(N-Z)^2}{A}$$

$$E_p(A, \gamma) = E_v + E_s + E_c + E_a + E_p$$

E_p : énergie d'appariement

les nucléons sont des fermions de spin $\frac{1}{2}$ si on prend en compte le couplage spin-orbite, il apparaît une structure en couche

des fermions appariés sont plus liés

$$= \alpha_p \begin{cases} A^{1/2} & \text{pair-pair} \\ 0 & \text{pair-impar} \\ -A^{-1/2} & \text{impar-impar} \end{cases}$$

les coefficients sont déterminés expérimentalement.

De plus, pour comprendre l'apparition de pics sur la courbe, par exemple pour l'hélium, l'hydrogène et l'oxygène, on doit prendre en compte le couplage spin-orbite, apparaît alors un modèle en couche, analogue au cas des électrons.

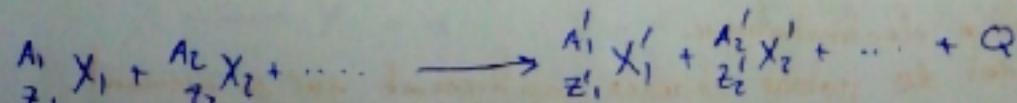
Si les atomes sont plus stables proches du fer, on peut voir dans grâce à la courbe deux types de réactions nucléaires.

jusqu'au fer on parle de fission, que l'on développera plus tard.

↓ Pour les noyaux plus lourds il peut y avoir fusion

Réaction nucléaire :

comme on l'a vu on note une réaction comme un échange



conservation énergie

où $Q = (\sum m_i - \sum m'_i)c^2 = (\sum E_{li} - \sum E_{lf})$: énergie indiquée des X'_i

conservation nb. nucl., proton, neutron

si Q positive produit de l'énergie, si Q négatif il faut fournir énergie c.à.d que les X'_i ont une énergie initiale

LPH2

FUSION, FISSION

(5)

2 - Fission

now allons d'abord aborder le cas de la radioactivité.

2-1 - Radioactivité:

Diazo

c'est un terme inventé par Pierre Curie qui a obtenu le prix nobel avec Marie Curie et Henry Becquerel qui l'a découvert en 1896

c'est un phénomène naturel au cours duquel des noyaux instables ~~instables~~
~~peut~~ se désintègrent en d'autre noyaux avec émission d'un rayonnement.

Concernant ce rayonnement on distingue 4 type de radioactivité:

Diazo: radioactivité gamma

qui est une désintégration du noyau avec émission d'un photon γ de haute énergie.

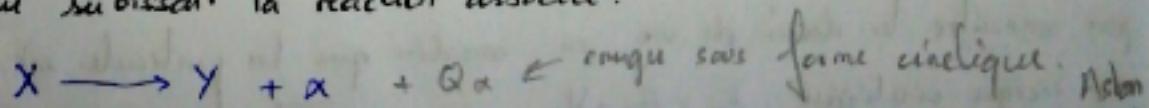
elle accompagne les autres type de radioactivité

Diazo: radioactivité β:

qui s'accompagne de l'émission d'un électron ou positron
observé pour les atomes en bleu et orange sur la courbe Diazo

et enfin la radioactivité alpha par hypothétiquement $A > 210$ en jaune sur la courbe

les particules alpha sont en fait des noyaux d'hélium-4: $\alpha = {}_2^4\text{He}$
ainsi, un noyau subissant la réaction associée:



donc
$$\boxed{{}_Z^AX \longrightarrow {}_{Z-2}^{A-4}Y + {}_2^4\text{He}} + Q_\alpha \text{ énergie libérée annihilante}$$

ce processus est un processus aléatoire, on connaît la loi de désintégration radioactive d'un échantillon de N₀ atome $N(t) = N_0 e^{-t/\tau}$

La constante de temps dépend de l'atome considéré, elle a une origine quelque que l'on peut comprendre grâce au mécanisme de Gamow.

Mécanisme de Gamow:

on suppose particule α dans noyau et doit s'échapper

La particule α est liée au noyau par un potentiel nucléaire à couplé fort.
Diapo

vient ensuite l'interaction coulombienne et on obtient le potentiel de Gamow
Diapo + V_{coulomb}

La particule α a une énergie E_α et on sait, par effet tunnel à une probabilité non nulle de franchir la barrière du potentiel et donc de s'échapper.

Pour comprendre comment on peut revenir au cas du potentiel quart carré
Diapo

potentiel quart carré: $P_{\text{passage}} \propto e^{-2Kd}$ où $K = \sqrt{\frac{2m(E_c - E_\alpha)}{\hbar^2}}$

pour calculer cette probabilité pour le potentiel de Gamow, on découpe l'hyperbole en une succession de rectangles jusqu'à $r=b$ et ensuite on passe à la limite

On a un résultat analogique avec une intégrale
potentiel de Gamow: $P \propto e^{-c/R} \int \frac{\sqrt{2(V-E_\alpha)m}}{\hbar^2} dr$ où V est le potentiel coulombien.

pour connaître la durée de vie on considère que la particule est libre et a une énergie cinétique $E_k = E_\alpha + V_0 \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2E}{m}}$ elle rebondit sur la paroi à une fréquence $\eta_{\text{coll}} = \frac{v}{2R} \Rightarrow \tau = nP$

Odg: ^{238}U , $E_\alpha = 4\text{MeV}$ et $\tau = 10^9 \text{ ans}$ nucléot stable
polonium ^{214}Po , $E_\alpha = 8\text{MeV}$ $\tau = 10^{-10} \text{ seconde} \Rightarrow$ instable

LPH2

FUSION, FISSION

⑥

Ce grand écart entre les valeurs viennent du fait que l'on a une exponentielle dans notre relation.

On va voir qu'il y a un autre mécanisme qui ne diffère pas réellement de celui-ci : la fusion spontanée

LPH 2

FUSION, FISSION

②

2-2-Fission spontanée:

Ce phénomène se produit pour typiquement $A > 230$ en sur
la courbe

Diapo

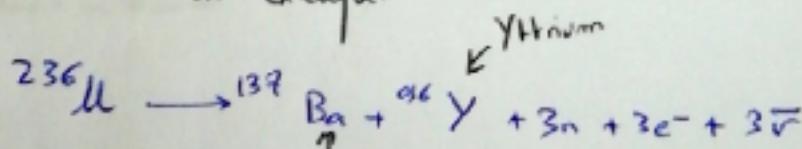
on dit qu'il y a fission spontanée, on comprendra mieux cette terminologie plus après, lorsque qu'un atome se fragmente en plusieurs produits

ex: 2 produits: $\frac{A}{Z} X \longrightarrow \frac{A_1}{Z_1} X_1 + \frac{A_2}{Z_2} X_2 + Q_F$ Energie de fission

on a donc l'énergie $Q_F = E_e(A_1, Z_1) + E_e(A_2, Z_2) - E_e(A, Z) > 0$

cette énergie va être positive dans la réaction libre de l'énergie.

regardons sur un exemple.



en regardant la courbe d'Aston

Diapo

$$Q_F \approx 137 \times 8,4 + 96 \times 8,7 - 236 \times 7,5 \approx 130 \text{ MeV}$$

ordre de grandeurs des réactions de fission.

on a là des énergies que l'on voudrait récupérer mais on a une réaction ici qui a une durée de vie très longue $\tau \approx 10^{16}$ années
cela vient du fait que l'on a là encore un phénomène quelque

Diapo

On peut considérer que le noyau d'uranium doit se distordre pour se scinder en deux fragments A et B.

Lorsque cette distorsion augmente, il y a diminution de l'interaction coulombienne mais elle est en compétition avec la force nucléaire résiduelle.

On doit passer par un maximum d'énergie, et se franchissant de barrière de potentiel se fait par effet tunnel.
Le rapport entre ces deux grandeurs probabilités est alors plus faible que pour la radioactivité α .

La question est alors, est-il possible d'avoir fission d'atome dans d'autres conditions,



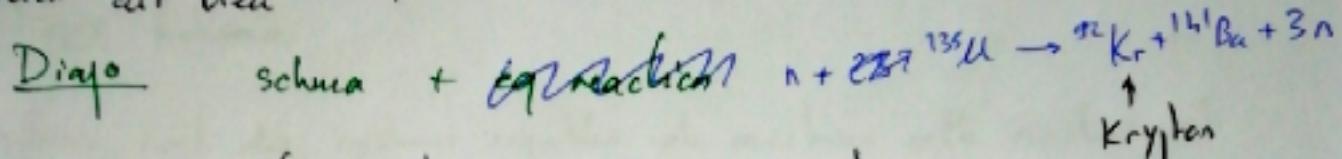
LPH2

FUSION, FISSION

2-3- Fission induite

2-3-1- Principe

Le but est alors de fournir de l'énergie à l'atome pour que la réaction ait lieu



On a ici un exemple de fission induite par neutrons
 si l'énergie apportée est suffisante pour dépasser la barrière de potentiel
 ou même pour que l'effet tunnel se produise avec une très
 grande probabilité, la réaction se produit rapidement.

si la réaction se produit rapidement on peut l'utiliser comme source
 d'énergie. De plus, on voit qu'il y a comme produit de machine des
 neutrons qui à leur tour peuvent induire une réaction
 cela nous amène à la notion de réaction en chaîne et au principe des
 réactions nucléaires

2-3-2- Réaction en chaîne : réacteur nucléaire.

On a réaction en chaîne par fission induite par neutron si la réaction produit un plus grand nb de neutrons : surégalité d'induit ou chaîne fission

Diagramme schéma

Les réacteurs sont des systèmes capables de maintenir cette réaction et d'utiliser l'énergie associée pour produire de l'énergie.

Pour ce faire :

Diagramme

On place donc ce que l'on appelle le cœur du réacteur le combustible c'est à dire, par exemple l'uranium.

Il arrive que lors de la réaction de fission les neutrons émis sont trop énergétiques pour provoquer efficacement une nouvelle fission.

On doit donc les ralentir, on les fait traverser de la matière, ce que l'on appelle le modérateur, qui peut être de l'eau ou du graphite.

L'énergie dégagée sous forme d'énergie thermique va chauffer un fluide, le fluide dit caloporteur avec du cœur l'énergie thermique et transmettre l'énergie les calories vers un système ~~dans~~ convertissant cette énergie en électricité. Le fluide caloporteur peut être l'eau qui joue aussi le rôle de modérateur ou ~~ou~~ est un métal liquide de sodium ou plomb par exemple.

La création d'électricité se fait par génération de vapeur qui entraîne des turbines

Il y a une dernière chose qui faut prendre en compte.

On veut qu'il y ait réaction en chaîne pour produire de l'uranium mais si cette réaction s'emballe cela peut être désastreux.

C'est ce qui s'est passé à Tchernobyl.

Il y a alors des barres de contrôle qui peuvent absorber des neutrons.
On les baisse plus ou moins dans le cœur de la réaction pour réguler la réaction.

Cette source d'énergie est notamment très développée en France mais si l'on regarde la courbe d'Aston

Diazo

les écarts d'uranium min et jeu sont plus important pour les noyaux d'uranium lourd.

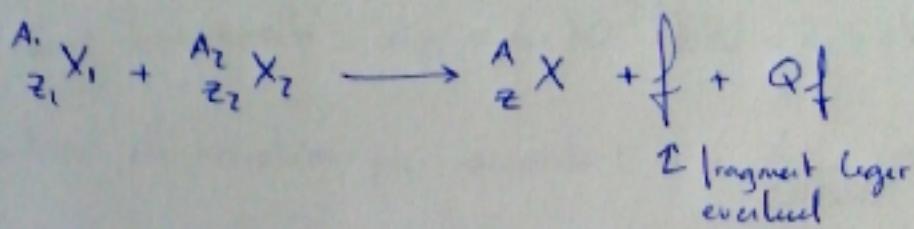
C'est à dire lorsque il y a fission

3 - Fusion

3-1- Principe :

Une réaction de fusion est le symétrique de celle de fission

Deux atomes fusionnent pour en donner un plus stable.



$$Q_f = E_c(A, z) - [E_c(A_1, z_1) + E_c(A_2, z_2)]$$

On peut comprendre comment les atomes ~~se touchent~~ ^{fusionne} et se rapprochent de la même façon que précédemment.

Les noyaux sont chargé pour qu'ils fusionnent il faut vaincre la barrière de potentiel due à l'interaction coulombienne pour que l'interaction fasse l'effort.

Plus les noyaux sont chargés et plus la barrière est importante pour augmenter la probabilité de ~~frapper~~ franchissant de la barrière de potentiel par effet tunnel il faut que les noyaux est une grande énergie cinétique

$$\underline{\text{QdG}}: E \sim 1 \text{ keV} \Rightarrow P \sim 10^{-13} \rightarrow \text{ peu probable}$$

$$E \sim 10 \text{ keV} \Rightarrow P \sim 10^{-3} \rightarrow T \sim \frac{E}{k_B} \sim 115 \text{ }^{\circ}\text{K}$$

la matière est sous forme de plasma

c'est donc des réactions de fusion qui se passent dans le
solil, on parle de nucleosynthèse stellaire que l'on va décrire
pour faire ressortir des ordres de grandeurs des énergies qui se jouent

3-2 Nucleosynthese stellaire.

La réaction globale au sein du



on suppose le soleil à l'équilibre

$$\text{il a pour luminosité: } L_\odot = h \cdot 10^{23} \text{ kW} = 2,5 \text{ eV} \cdot s^{-1}$$

$$\text{combien de réaction par seconde: } n = \frac{L_\odot}{27\text{ MeV}} = 9 \cdot 10^{37} \text{ réactions} \cdot s^{-1}$$

or 1 réactions $\Rightarrow 4$ protons consommés

$$\Rightarrow \frac{dp}{dt} = -4n = -4 \cdot 10^{38} \text{ protons} \cdot s^{-1}$$

variation
nb protons

le soleil consomme donc consomme $\frac{dp}{dt} \approx h \cdot 10^{11} \text{ kg} \cdot s^{-1}$ de protons

$$M_\odot \approx 10^{30} \text{ kg}$$

si la source d'énergie du soleil était

si source: fusion: $5 \cdot 10^2 \text{ kg} \cdot s^{-1}$ d'uranium

$$\text{pétrole: } 10^{19} \text{ kg} \cdot s^{-1}$$

on a donc des énergies libérées colossales, de grands projets de recherches sont en cours pour utiliser cette source d'énergie

3-3-Vers la fusion industrielle:

Pour que la fusion contrôlée soit intéressante, il faut que l'énergie ~~soit fournie~~ fournie par les réactions soit au moins égale à l'énergie à fournir à l'installation où ont lieu les réactions.

Ce critère est appelé

critère de Lawson

on définit τ : temps de confinement
durée où plasma reste à T

on veut $E_{chaufrage} < E_{fusion}$

$$\Leftrightarrow \frac{3n k_B T}{\text{densité volumique}} < f \frac{Q}{\tau} \eta$$

\uparrow \downarrow
Trendant
taux de réaction volumique

$$\Leftrightarrow n\tau \geq 1,5 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3} s$$

pour obtenir cet ordre de grandeur il existe plusieurs types de confinement
on passe à une

Définition	grav	→ étoile	étoile	conf. gravitationnel	$n (\text{m}^{-3})$	$\tau (s)$	$n\tau (\text{m}^{-3}s)$	$T (K)$
laser	← laser	laser	laser	inertiel	$7 \cdot 10^{30}$	10^{17}	$7 \cdot 10^{47}$	10^3
magné	→ Iler	Iler	Iler	magnétique	10^{20}	1	10^{20}	$1,7 \cdot 10^8$

Iler est un projet de réacteur silencieux dans le sud de la France.

Pour avoir ce confinement magnétique, le plasma se situe dans un tokamak

Déf le champ magnétique est produit grâce à des bobines et aimants