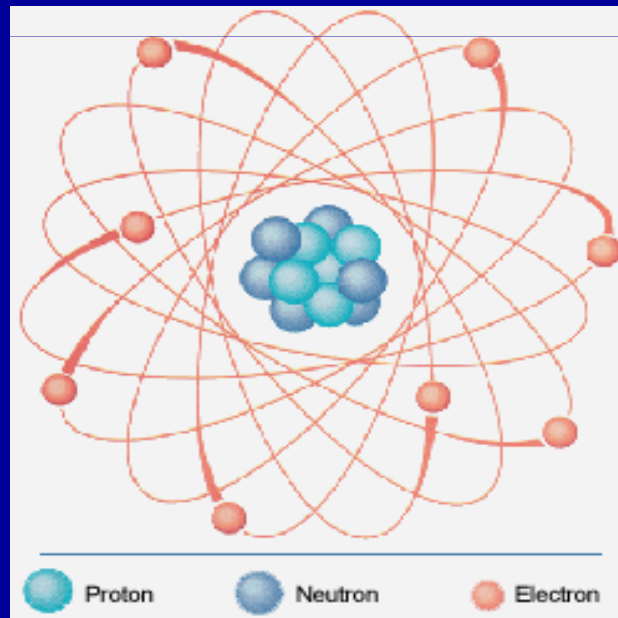


Eléments de Physique Nucléaire





SOMMAIRE

Chapitre I :
Caractéristiques générales du Noyau

Chapitre II :
Énergie de liaison du Noyau

Chapitre III :
Transformations radioactives

Chapitre IV :
Réactions Nucléaires

Chapitre V :
Interaction Rayonnement- Matière

Chapitre II :

Énergie de liaison du Noyau

I – Masse - Énergie de liaison

- 1) Masse des noyaux – excès de masse*
- 2) Spectromètre de masse – principe*
- 3) Énergie de liaison – courbe d'Aston*

II - Modèle de la Goutte Liquide

- 1) Relation de Bethe et Weizsäcker
- 2) Noyaux stables – Nombres magiques
- 3) Insuffisances du modèle

I – Masse - Énergie de liaison

1) Masse des noyaux – excès de masse

- Au premier ordre la masse atomique $M(A,Z)$ d'un élément est donnée par le nombre de masse A
- Mais en général, la masse réelle d'un atome diffère de A . Cette différence est nommée « excès de masse » $\Delta M(Z,A)$:

$$\Delta M(Z,A)_u = M(Z,A)_u - A \times (1u)$$

l'excès de masse peut aussi être exprimé en MeV :

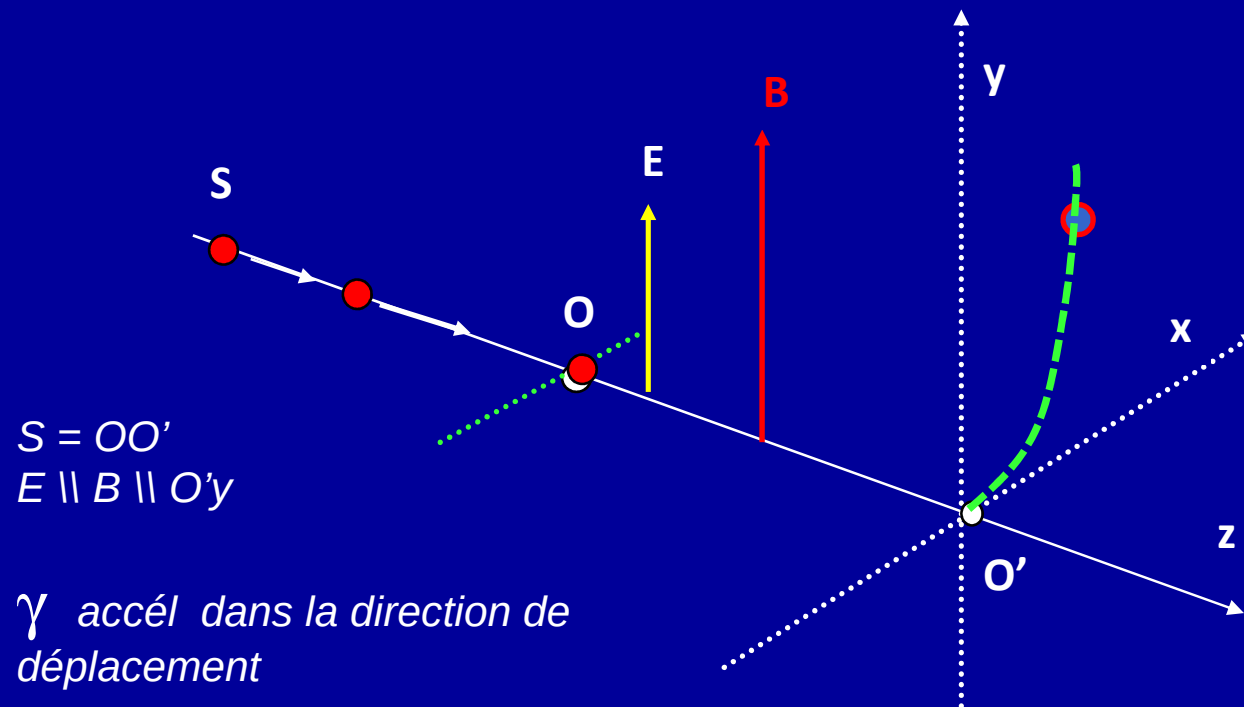
$$\Delta M(Z,A)_{(MeV)} = M(Z,A)_{(MeV)} - 931,5 A$$

- Les masses atomiques $M(Z,A)$ peuvent être déterminées avec précision à l'aide de **spectromètres de masse** ou à partir des désintégrations radioactives et des réactions nucléaires

Mesure des masses atomiques : la spectrométrie de masse

Action combinée d'un champ électrique E et d'un champ magnétique B sur des particules chargées pour les séparer suivant la valeur du rapport de leur charge q et de leur masse m : (q/m) .

Atomes neutres $\longrightarrow$ ions de vitesses V différentes $\longrightarrow$ propagation
 $\longrightarrow$ pénétration dans la zone où s'exercent les champs E et B .



❑ dans le cas ou **seul le champ E est appliqué** :

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E} = m \vec{\gamma} \longrightarrow \gamma = E \cdot \frac{q}{m}$$

Accélération communiquée à la particule dans la direction parallèle à O'y .

La déviation y de la trajectoire s'écrit : $y = \frac{1}{2} \gamma \cdot t^2$

et puisque $t^2 = \frac{s^2}{v^2}$



$$y = \frac{1}{2} \frac{qE}{m} \frac{s^2}{v^2}$$

❑ avec **B seul** :

$$\vec{F} = q(\vec{v} \wedge \vec{B}) \longrightarrow |\vec{F}| = q \cdot v \cdot B$$

Pour de faibles déviations F est // à Ox et $x = \frac{1}{2} \gamma t^2$ avec $\gamma = \frac{q}{m} B \cdot v$



$$x = \frac{1}{2} \frac{qB}{m} \frac{s^2}{v}$$

❑ **Quand E et B sont appliqués** simultanément :

L'ion positif est dévié en un point **(x,y)** tel que les deux relations précédentes soient vérifiées.

En éliminant la vitesse **v** entre x et y on obtient la fonction $y = f(x)$ qui est l'équation de la trajectoire :

$$y = \left(\frac{2 E}{s^2 B^2} \right) \frac{m}{q} x^2$$

Remarques :

- 1) Sur l'écran xO'y tous les ions ayant **même masse et même charge** mais des **vitesse différentes** se placent sur les **différents points de la parabole**
- 2) Les ions ayant des **rapport q/m différents** se placeront sur des **paraboles différentes**. Chaque arc de parabole est donc caractéristique d'un rapport q/m

2) Énergie de liaison

La masse $m(A, Z)$ d'un noyau est inférieure à la somme des masses de Z protons et de N neutrons :

$$m(A, Z) < Z.m_p + N.m_n$$

Il y a donc un défaut de masse $\Delta m(Z, A)$ défini par :

$$\Delta m(Z, A) = (Z.m_p + N.m_n) - m(A, Z)$$

Cette différence est **toujours positive** . Exprimée en unité d'énergie (MeV) elle est appelé **énergie totale de liaison** :

$$B_{\text{tot}}(A, Z) = \Delta m(Z, A).c^2$$

$B_{\text{tot}}(A, Z)$ représente le **travail nécessaire pour dissocier les nucléons** du noyau.

et

$$m(A, Z) = [Z.m_p + N.m_n] - B_{\text{tot}}(A, Z) / c^2$$

Remarque 1:

Les énergies de liaison des noyaux sont en MeV, alors que celle des électrons dans les atomes sont de l'ordre de l'eV. Il y a donc un facteur de 10^6 entre l'énergie nucléaire et l'énergie chimique, pour une même masse de réactifs.

Remarque 2:

En pratique on utilise **les masses atomiques** plutôt que les masses nucléaires :

$$M(A,Z) = m(A,Z) + Z.m_e - B_e/c^2$$

où m_e est la masse de l'électron et B_e la valeur absolue de l'énergie de liaison des Z électrons. B_e , de l'ordre de l'eV est négligeable :

$$B_{\text{tot}}(A,Z) = [Z.m_H + N.m_n - M(A,Z)].c^2$$

où $M(A,Z)$ est la masse atomique de l'élément $X(A,Z)$ et m_H celle de l'hydrogène

Exemple : Energie de liaison du deuton

Le noyau le plus simple est le **deuton (d)** constitué d'un proton et d'un neutron.

Sa masse est $m_d = 2,013554 \text{ u}$

Calculons $(m_p + m_n) = 1,007277 \text{ u} + 1,008665 \text{ u} = 2,015942 \text{ u}$

On voit que : $m_d < (m_p + m_n)$

Le défaut de masse est $\Delta m(Z,A) = [(m_p + m_n) - m_d] = 0,002388 \text{ u}$

ce qui correspond à une énergie de liaison : $B(d) = 2,225 \text{ MeV}$.

Cette énergie sert à lier les deux particules ensemble.

Pour les séparer, c'est à dire vaincre la force nucléaire, il faut fournir une énergie minimale de 2,225 MeV.

3) Énergie de séparation

L'énergie de séparation d'un nucléon ($S_p(Z,N)$ et $S_n(Z,N)$) est
L'énergie nécessaire pour enlever un proton ou un neutron du
noyau.

Pour un proton :

$$S_p(Z,N) = M_{\text{noy}}(Z-1, N) + m_p - M_{\text{noy}}(Z,N)$$

compte tenu de la définition de l'énergie de liaison B :

$$S_p(Z,N) = B(Z,N) - B(Z-1, N)$$

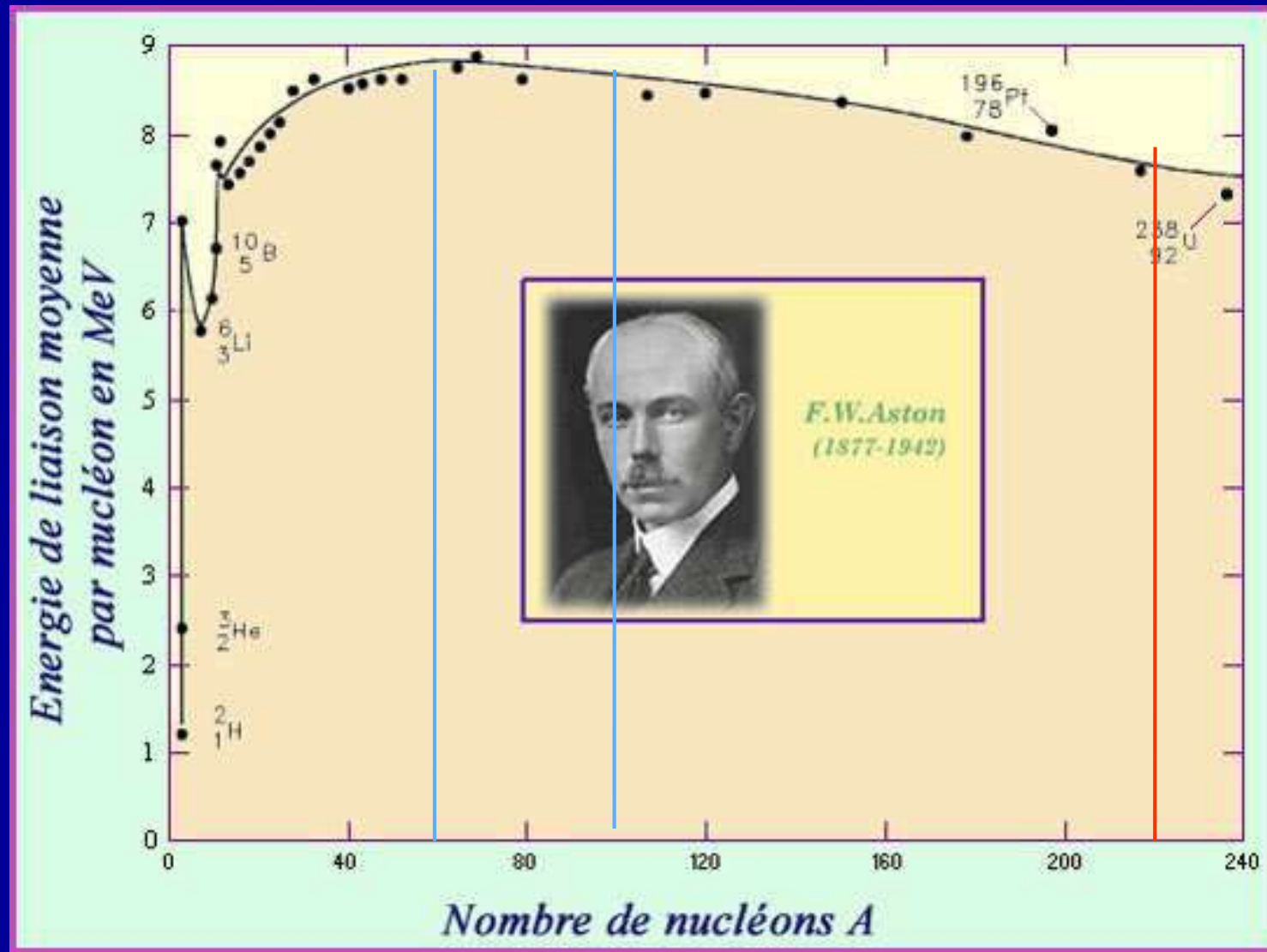
Pour un neutron :

$$S_n(Z,N) = M_{\text{noy}}(Z, N-1) + m_n - M_{\text{noy}}(Z,N)$$

soit en termes d'énergie de liaison:

$$S_n(Z,N) = B(Z,N) - B(Z, N-1)$$

Énergie de liaison moyenne par nucléon $B_{\text{moy}}(A,Z) = B_{\text{tot}} / A$



L'énergie de liaison par nucléon **représente l'énergie à dépenser en moyenne pour arracher un nucléon d'un noyau**. C'est un étalon de la stabilité d'un noyau.

Commentaire de la courbe de ASTON

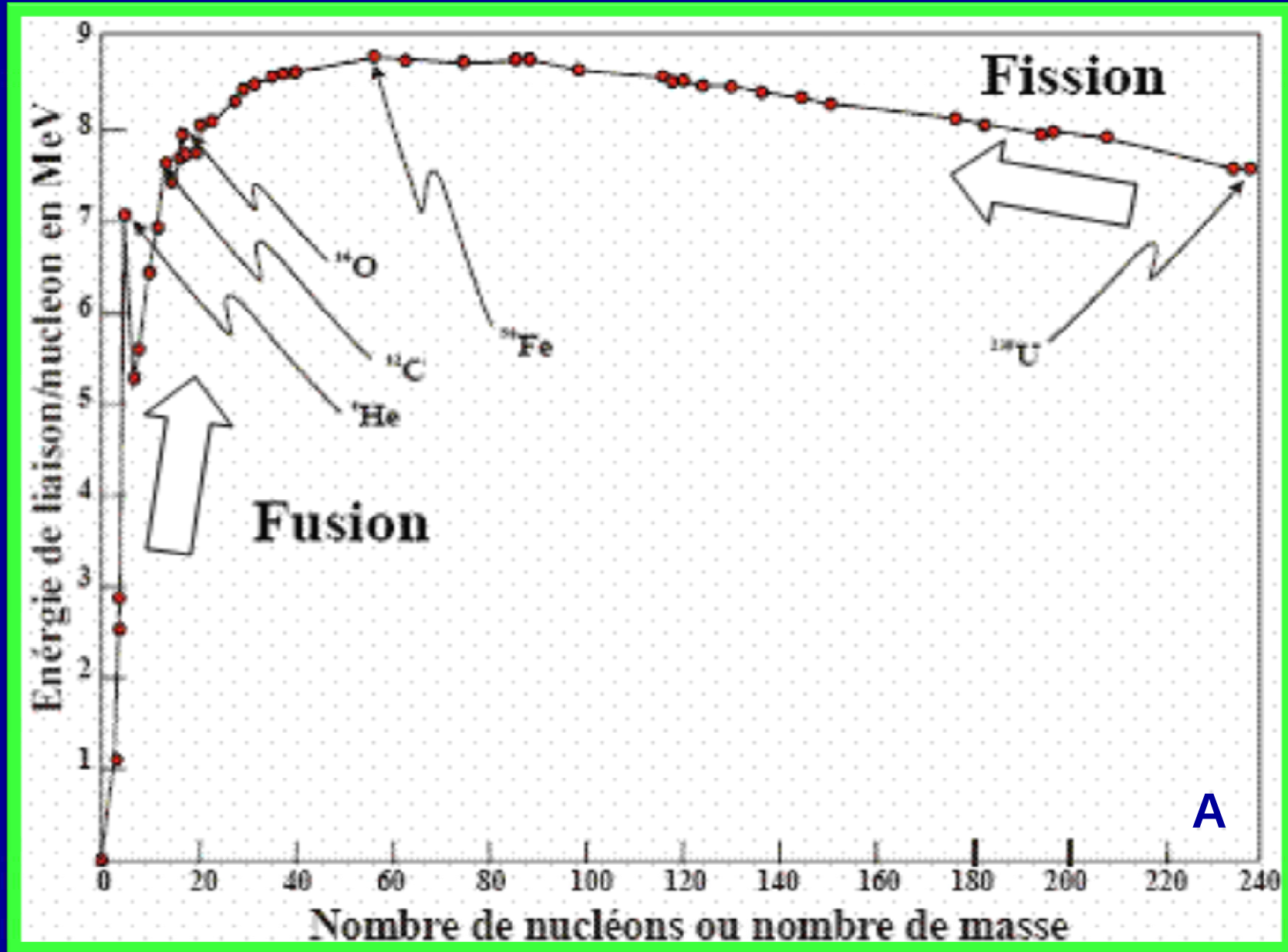
- a) Les **noyaux très légers** sont peu liés, à l'exception de l'hélium-4 (α) dont l'énergie de liaison de 7 MeV par nucléon est très supérieure à celle de ses voisins, **deutérium, tritium, hélium-3, lithium**.
- b) Pour $30 < A < 210$ B_{moy} est quasiment indépendant de A , avec une valeur de l'ordre de 8 MeV par nucléon. Ceci peut-être interprété par la propriété de **saturation des forces nucléaires** : un nucléon donné n'est pas lié de la même façon à tous les nucléons du noyau.
- c) B_{moy} passe par un maximum très aplati de 8,7 MeV pour le nickel-62 et diminue ensuite lentement pour atteindre 7,3 MeV pour l'uranium. Ce sont donc **les noyaux de masses intermédiaires qui sont les plus liés**, donc les plus stables.
- d) Pour les valeurs de $A > 80$, B_{moy} la décroissance lente de l'énergie de liaison des nucléons résulte de **l'augmentation de l'influence de la force coulombienne**.
- e) Les nombres « magiques » (2, 8, 20, 28, 50, 82, 126) sont des nombres de protons et/ou de neutrons pour lesquels un noyau est particulièrement stable. Dans le modèle en couche, ces nombres correspondent à un arrangement en **couches complètes**.

la structure de ^4He (particule α) est particulièrement stable, comparée à ses voisins : c'est un noyau doublement magique.

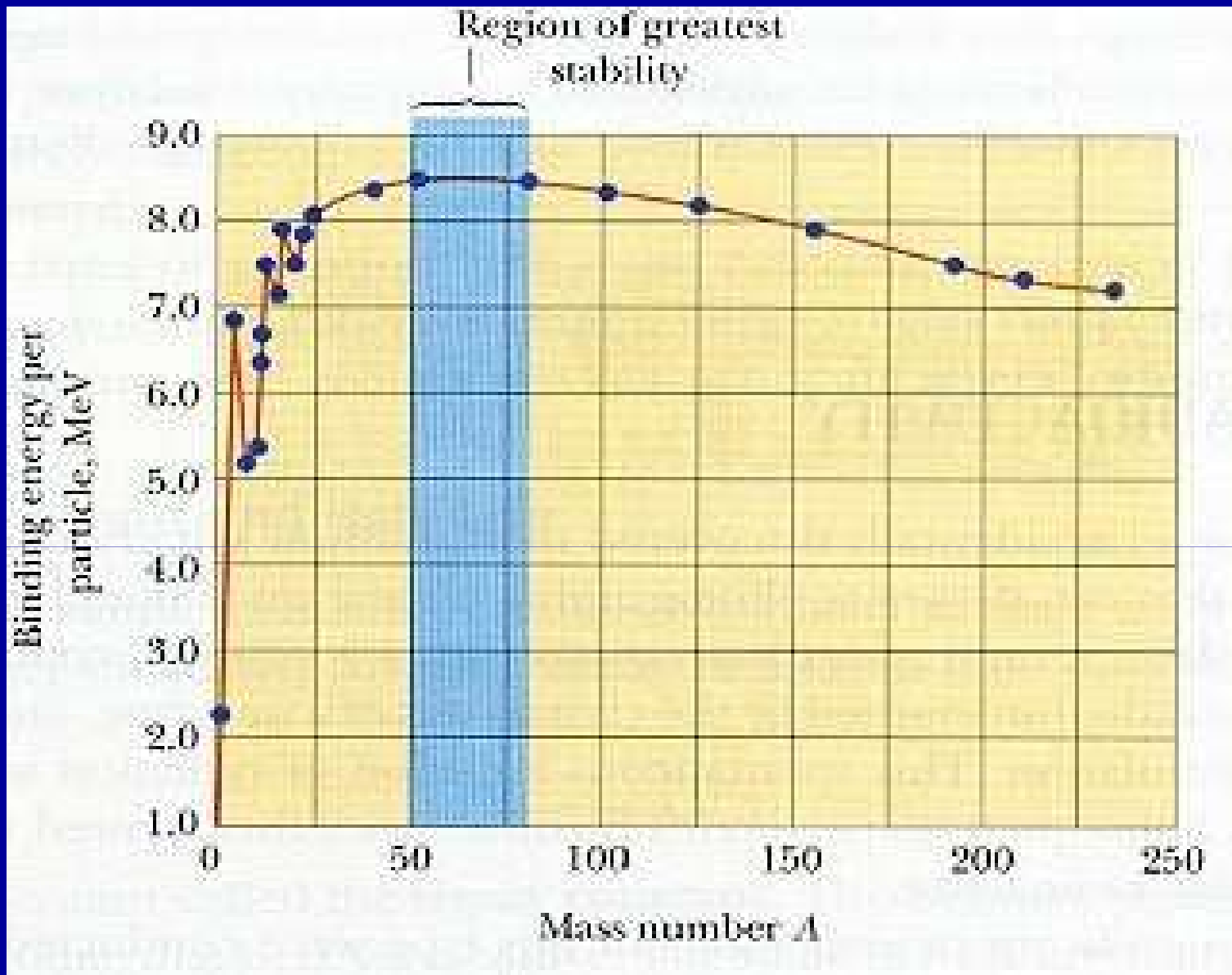
	H	^2H	^3H	^3He	^4He	^6Li	^7Li
B (MeV)	0	2.22	8.48	7.72	28.3	32	39.2
B/A (MeV/A)	0	1.11	2.83	2.57	7.07	5.33	5.60

Nous verrons que cette stabilité particulière explique l'émission de particules alpha par des noyaux lourds.

$B_{\text{moy}}(A, Z)$

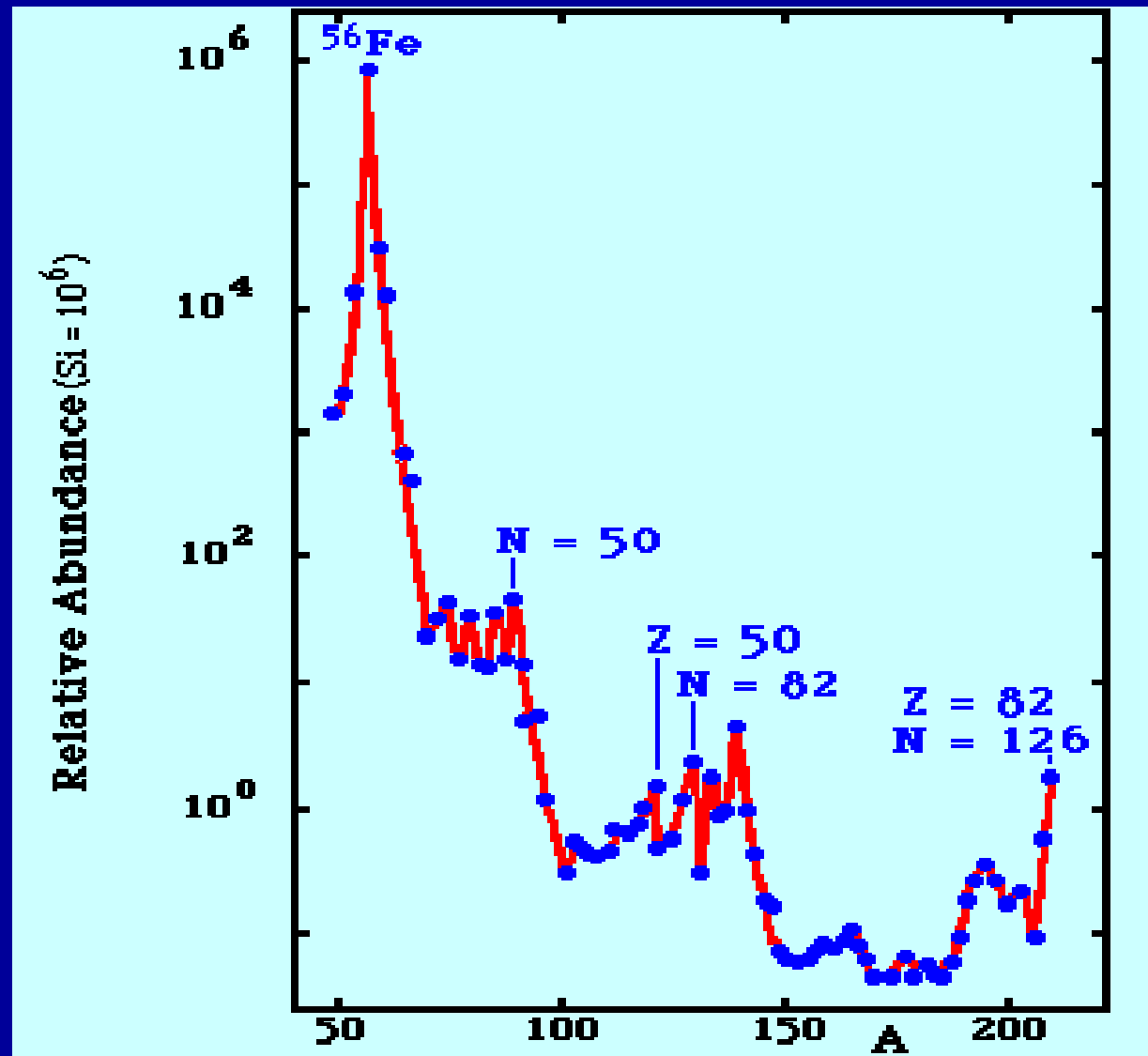


A



REF. http://lr.in2p3.fr/~mine/noyaux/c1_1.pdf

Les éléments ayant une valeur de Z ou N correspondant à un nombre magique sont plus abondants dans la nature que leurs voisins immédiats



II - Modèle de la Goutte Liquide

-On veut construire **un modèle simple du noyau** qui redonne une énergie de liaison en accord avec l'expérience.

- Modèle suggéré par Bohr, par analogie avec la cohésion d'une goutte liquide (ou la propriété de saturation se manifeste aussi).

-Les hypothèses de base de ce modèle sont :

- le noyau est une **matière incompressible** (R est proportionnel à $A^{1/3}$)
- la force nucléaire est la même pour le neutron et le proton (**indépendance de charge**)
- la force nucléaire est **à courte portée**.

A partir de ces hypothèses **Bethe et Weizsäcker** ont proposé la formule semi-empirique suivante :

$$B(A, Z) = a_v \cdot A - a_s \cdot A^{2/3} - a_c \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - a_{sy} \frac{(N-Z)^2}{A} + \delta(Z, N)$$

Cette relation de Bethe et Weizsäcker fait apparaître cinq termes dans l'énergie de liaison :

le premier terme est l'énergie de volume : B/A est presque constant (saturation des forces nucléaires) . C'est la contribution principale apportée à $B(A,Z)$

le second est l'énergie de surface, qui représente la **perte d'énergie de liaison des nucléons** de la surface et qui ont donc moins de voisins que ceux situés au cœur du noyau. Ce terme (dit de tension superficielle) est proportionnel au nombre de nucléons de surface, donc à l'aire de cette surface, c'est à dire à $A^{2/3}$. Il tend à donner une forme sphérique à la goutte (noyau).

Le terme d'énergie coulombienne : La répulsion électrostatique des protons tend à diminuer $B(A,Z)$. Si on considère le noyau comme une sphère de rayon R de charge Q uniformément répartie (ce qui est approximatif du fait de la présence des neutrons) son énergie électrostatique est :

$$W = \frac{3}{5} \frac{Q^2}{R} = \frac{3}{5} \frac{e^2 Z^2}{R_0 A^{1/3}} = a_c \frac{Z^2}{A^{1/3}}$$

MAIS ce calcul est inexact : il suppose que la charge de chaque proton est répartie dans toute la sphère de R !!

Correction : un objet de charge $Z=1$ et de rayon R n'est pas un proton !! Donc l'expression de W contient **pour chaque proton**, un terme d'énergie intrinsèque égal à $3.e^2/5R$ qui ne correspond à aucun corps physique réel .

Aussi, il faut soustraire ce terme pour les Z protons , pour avoir une énergie d'interaction correcte entre paires de protons.


$$W = \frac{3}{5} \frac{e^2 Z^2}{R} - \frac{3e^2 Z}{5R} = a_c \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}}$$

Le terme d'asymétrie : permet de tenir compte du fait que dans les noyaux stables lourds, $N > Z$ (pour les légers on a $N \approx Z$) . L'excès de neutron fournit un **supplément d'énergie de liaison nucléaire pour compenser l'augmentation d'énergie de répulsion coulombienne**.

L'énergie d'asymétrie est la différence d'énergie nucléaire entre un noyau ayant N neutrons et Z protons et l'isobare construit avec $A/2$ neutrons et $A/2$ protons.

Terme d'appariement $\delta (Z,N)$: Les nucléons de même nature ont tendance à se grouper par paires de nucléons à spins antiparallèles.

La force nucléaire n'est donc pas indépendante du spin. Les noyaux pairs-pairs sont plus liés que les noyaux impairs de masses comparables

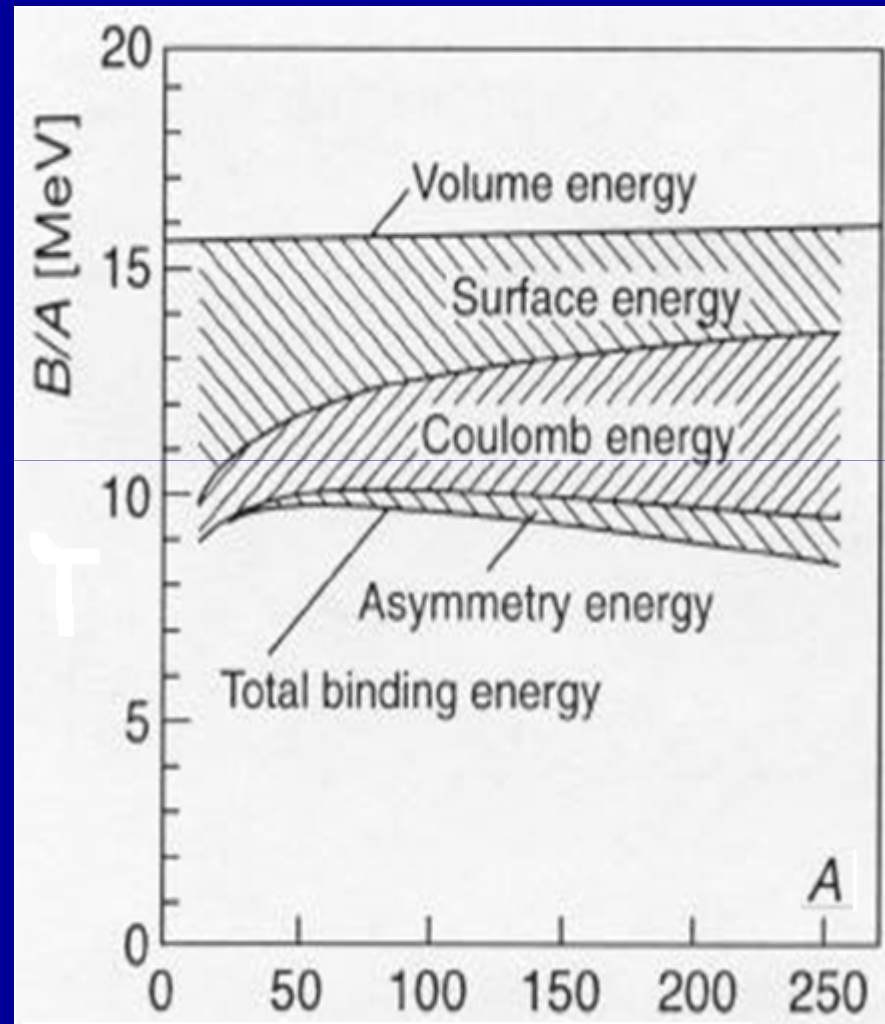
$$\delta (Z ; N) = \begin{cases} +12 A^{-1/2} (\text{MeV}) & \text{si N et Z pairs} \\ 0 & \text{si A impair} \\ -12 A^{-1/2} (\text{MeV}) & \text{si N et Z impairs} \end{cases}$$

D'où :

$$B(A, Z) = a_v \cdot A - a_s \cdot A^{2/3} - a_c \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - a_{sy} \frac{(N-Z)^2}{A} + \delta(Z, N)$$

Avec (en MeV) : $a_v = 15,6$; $a_{\text{surf}} = 18,5$; $a_c = 0,7$ et $a_{\text{sym}} = 23,5$

Contributions relatives à l'énergies de liaison par nucléon en fonction du nombre de masse A (relation de **Bethe et Weizsäcker**)



Équation de la vallée de la stabilité

La formule semi-empirique donnant la masse peut s'écrire :

$$M(A,Z) c^2 = \alpha Z^2 + \beta Z + \gamma.(+/- \delta)$$

$$\alpha = a_c A^{-1/3} + 4a_{sy} A^{-1}$$

Avec $\beta = (M_H - m_n)c^2 - 4a_{sy} \square - 4a_{sy}$

$$\gamma = (M_n c^2 - a_v + a_s A^{-1/3} + a_{sy}) A$$

Quand A est constant et *impair*, c'est l'équation d'une *parabole*

Quand A est constant et *pair*, l'équation donne *2 paraboles* espacées de 2δ

La masse $M(A,Z)$ passe par un minimum d'abscisse Z_{stab} obtenue en annulant la dérivée :

$$\frac{dM(A,Z)}{dZ} = 0 \quad \text{pour} \quad \boxed{Z_{stab} = \frac{-\beta}{2\alpha} = \frac{47A}{0,7A^{2/3} + 94}}$$

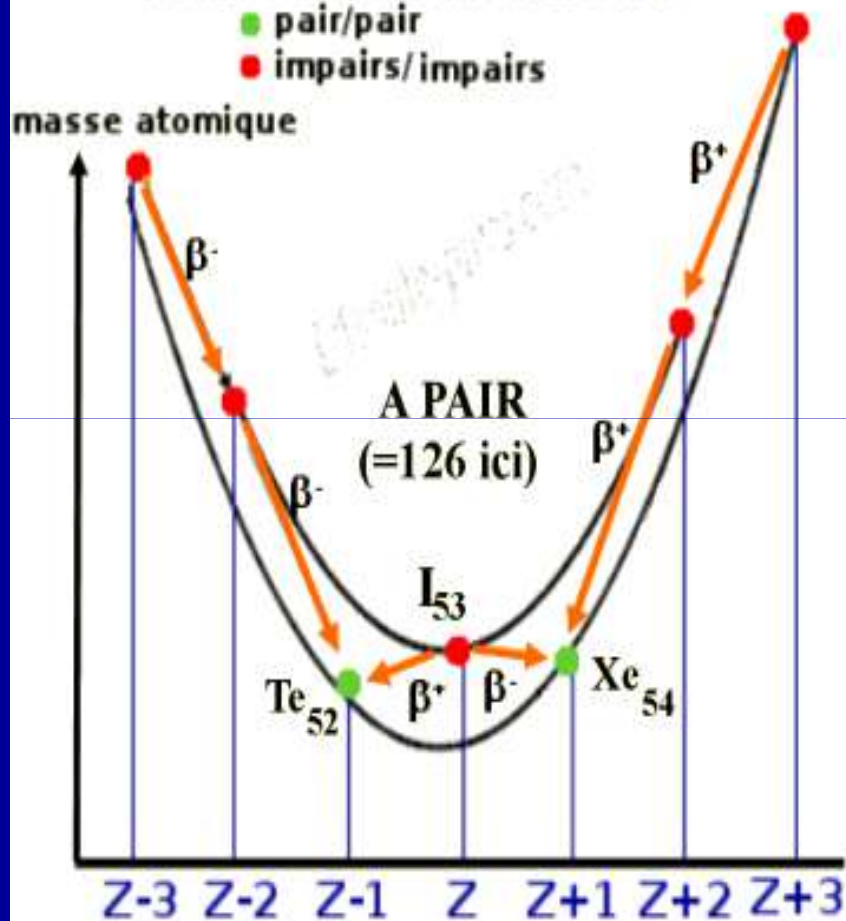
quand le nombre de masse est pair
2 paraboles coexistent avec :

nombre de protons/neutrons :

● pair/pair

● impairs/impairs

masse atomique

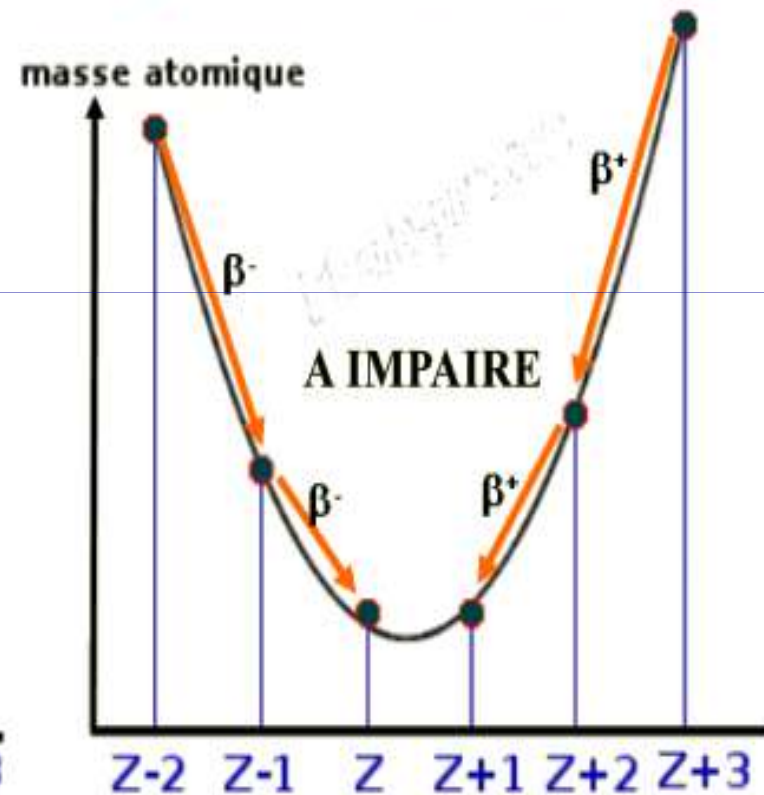


quand le nombre de masse est impair
une seule parabole existe avec :

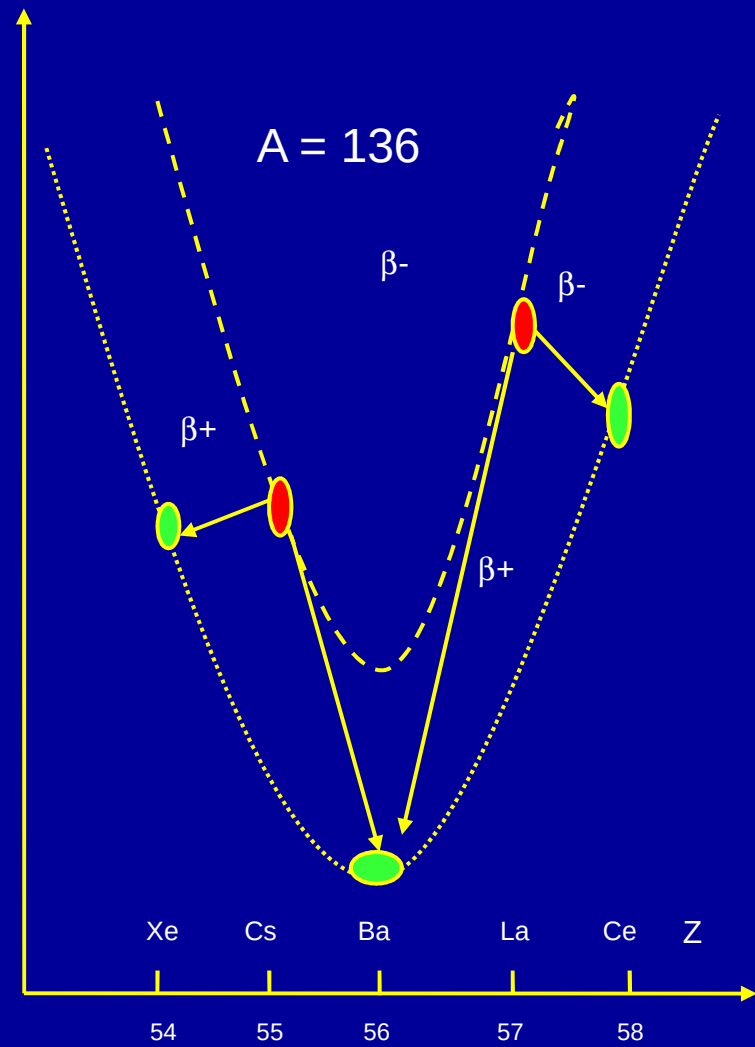
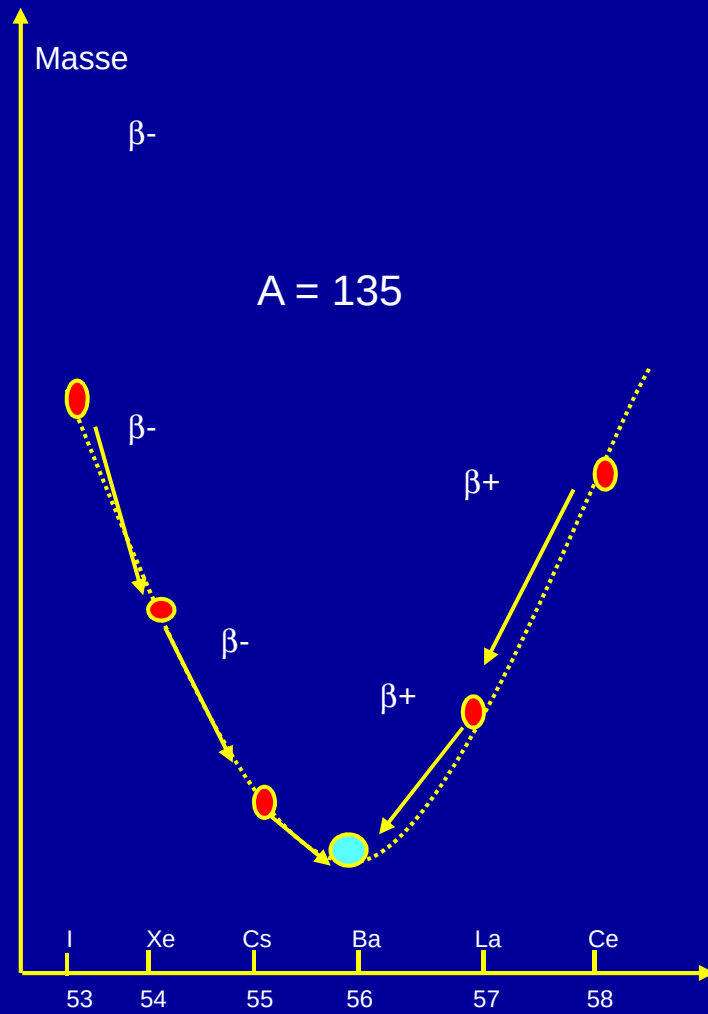
nombre de protons/neutrons :

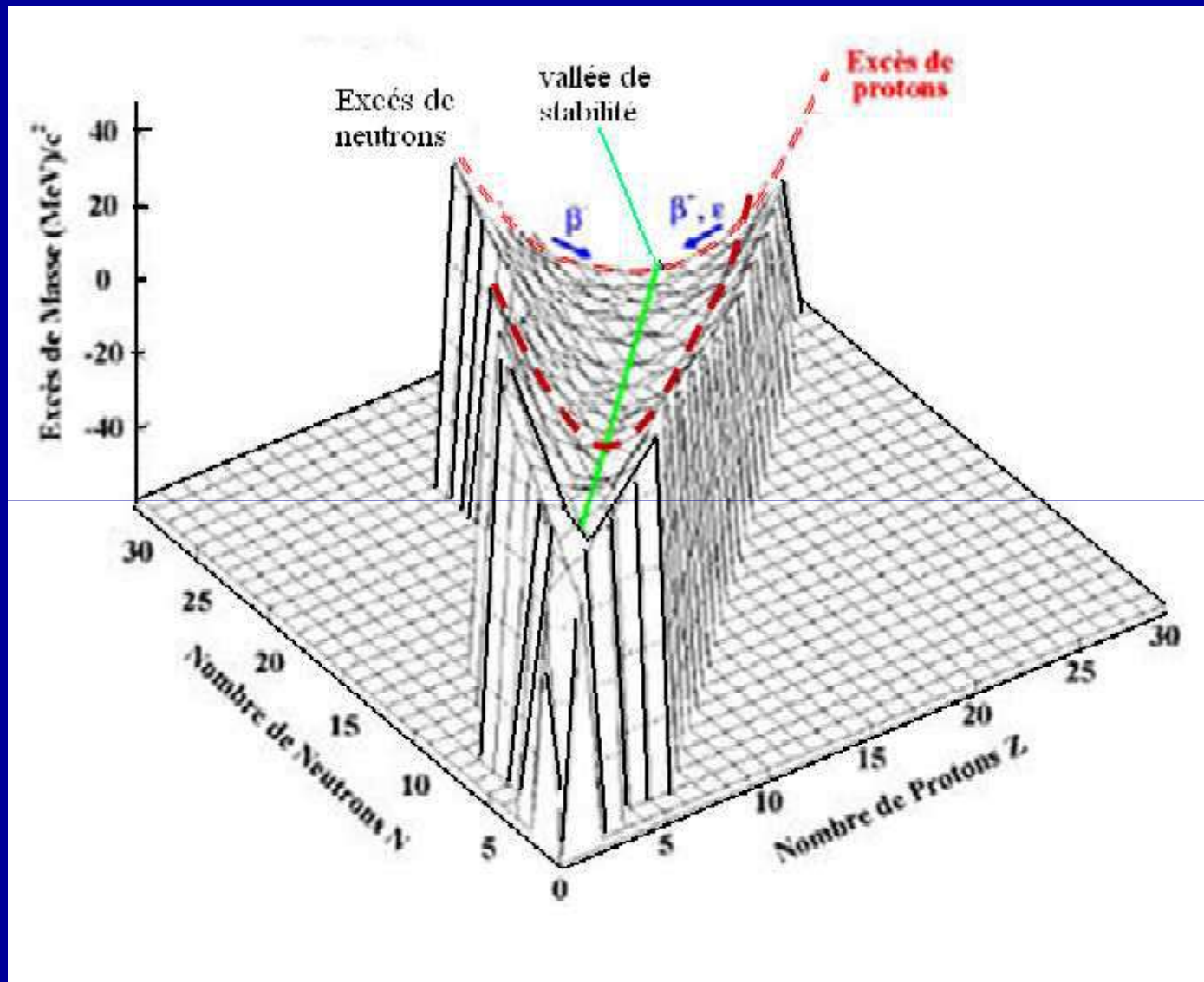
● pair/impair , impair/pair

masse atomique



Autres exemples





Insuffisances du modèle de la goutte liquide:

- pour les **noyaux légers** (l'image de la goutte liquide n'est pas bien adaptée)
- au voisinage des couches fermées (**nombre magiques**). Cette fermeture entraîne une plus grande stabilité du noyau qui n'est pas reflétée par la relation de **Bethe et Weizsäcker**
- pour les **noyaux très lourds** ($A > 240$) pour lesquels la forme n'est plus sphérique, ce qui inclue un terme correctif important.