

Comprendre le noyau : le programme

« Celui qui trouve sans chercher est celui qui a longtemps cherché sans trouver » Bachelard

Premier cours : Qu'est-ce que c'est un noyau ?

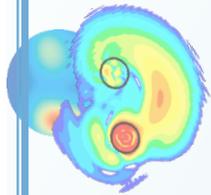
- I. Les échelles de la physique nucléaire et comment voir le noyau ?
- II. La « glue » du noyau et ses conséquences
- III. Ca pèse combien un noyau ? Masse et énergie de liaison
- IV. Les noyaux instables. Combien y en a ? Comment on les fabrique ?

Deuxième cours : En théorie ça se passe comment ?

- I. Les modèles macroscopique (la goutte liquide)
- II. Les modèles microscopiques (le modèle en couche)

Troisième cours : La trousse à outils du physicien nucléaire

- I. Comment on étudie les noyaux ?
- II. Comment on fabrique les noyaux pour les étudier ?
- III. Les réactions directes
- IV. Bonus : astrophysique nucléaire



QUELLE EST LA FORCE DE LA FORCE NUCLÉAIRE ? COMBIEN PÈSE UN NOYAU ?



► Ce que la carte des noyaux nous apprend...



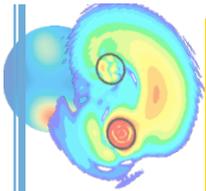
► Ca pèse combien un noyau ? La masse des noyaux



► Elle est forte comment la glue du noyau ?

- la **masse** des noyaux

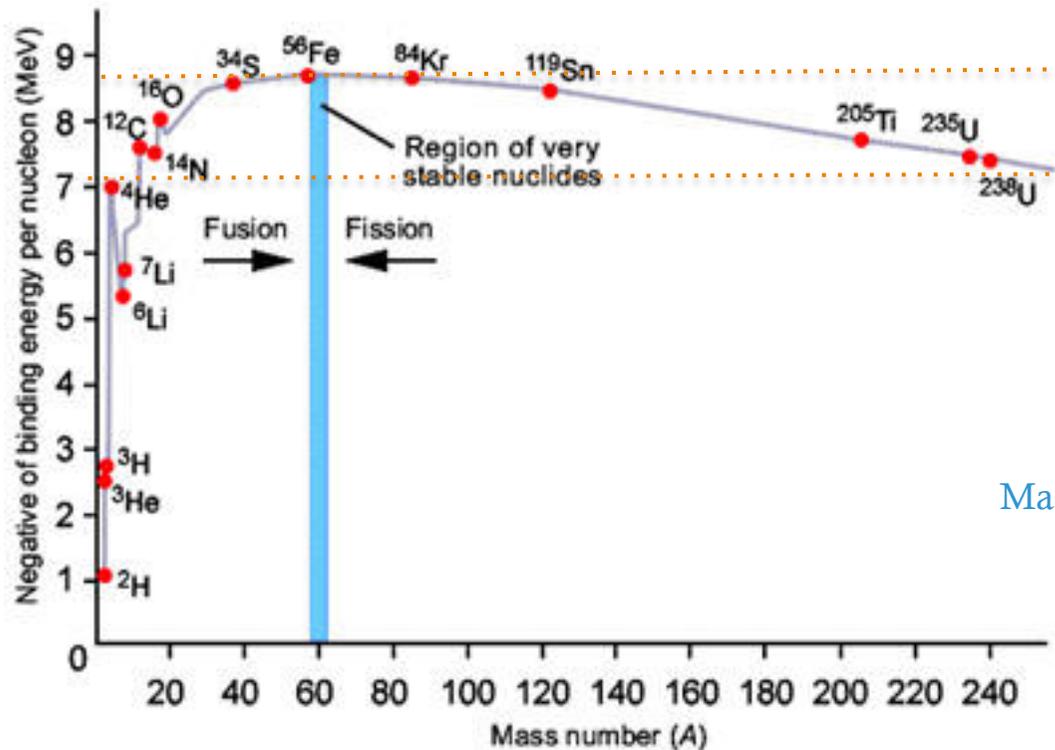
- l'**énergie de liaison** des nucléons dans le noyau



LA FORCE DE L'INTERACTION FORTE...

- ▶ Combien de neutrons et de protons peut-on mettre dans un noyau ?
- ▶ Comment le nucléon est-il lié ?

Energie de liaison / nucléon



$E/A \text{ max} = 8 \text{ MeV}$

$E/A = 7 \text{ MeV}$

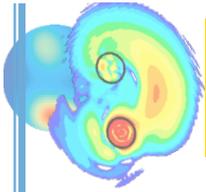


Masse du noyau

Masse de ses
constituants
(neutrons &
protons)

- ▶ Les noyaux les plus liés ($A < 16$) sont des multiples de ^4He

$$\begin{aligned}
 B(N,Z) - B(2,2) \times n &= -0,09 \text{ MeV} & n=2 \\
 &= 7,27 \text{ MeV} & n=3 \\
 &= 14,44 \text{ MeV} & n=4
 \end{aligned}$$



QU'EST-CE QUE ÇA NOUS APPREND SUR LE NOYAU ?

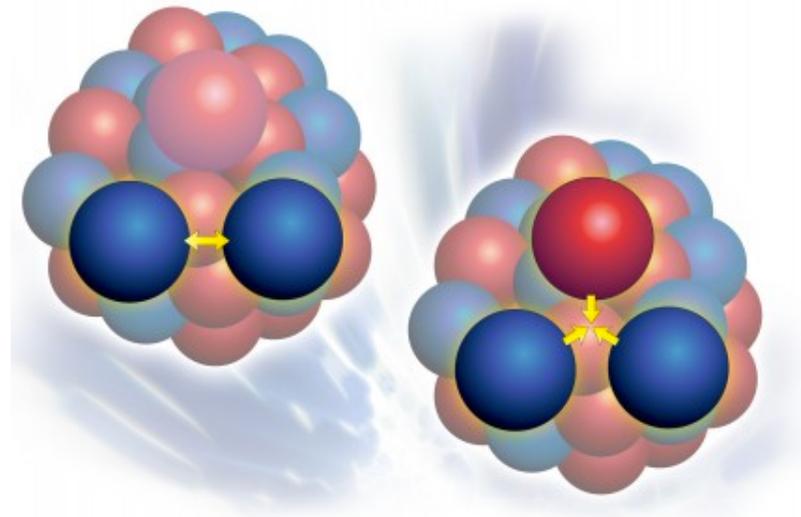
E/A constant pour $A > 20$

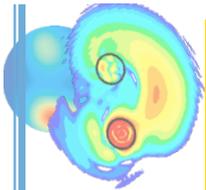
→ l'interaction nucléaire est principalement une force à **2 corps** avec une moindre contribution des forces à 3 et 4 corps.

→ pas de force à 1 corps !

Analogie avec l'électron de l'atome :

ils sont liés par un potentiel central électrostatique créé par les protons du noyau
il y a donc une force qui agit sur l'électron même s'il est seul (cas de l'H)





COMMENT COMPRENDRE LA SATURATION DE LA FORCE NUCLÉAIRE ?

$E =$ énergie par liaison

Force à 2 corps (max) Énergie/nucleon

$A = 2$



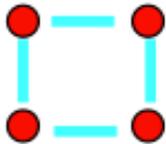
$$E/2$$

$A = 3$



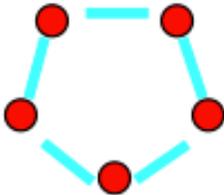
$$3E/3 = E$$

$A = 4$



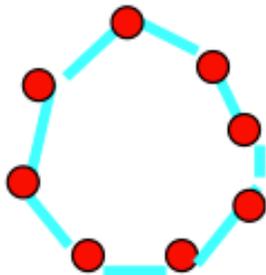
$$4E/4 = E$$

$A = 5$



$$5E/5 = E$$

$A = 8$



$$8E/8 = E$$

saturation à E

Force à 3 corps (max) Énergie/nucleon

$A = 2$



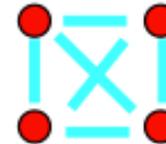
$$E/2$$

$A = 3$



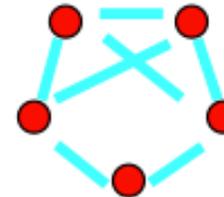
$$3E/3 = E$$

$A = 4$



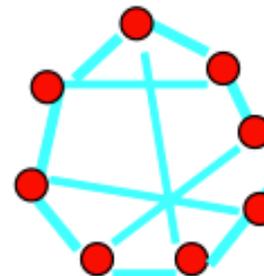
$$6E/4 = 1,5E$$

$A = 5$



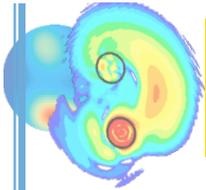
$$10E/5 = 1,5E$$

$A = 8$



$$12E/8 = 1,5E$$

saturation à $1,5E$

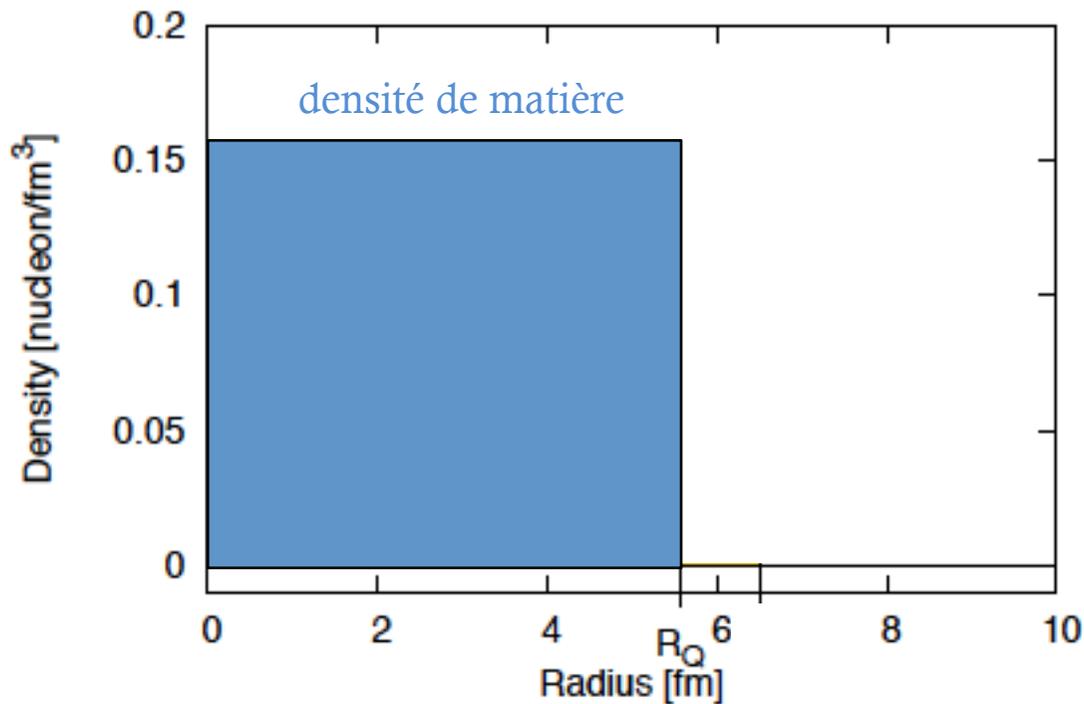


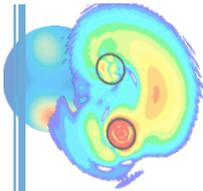
LA DENSITÉ DES NOYAUX

Volume du noyau = $A \times 7,3 \times 10^{-45} \text{m}^3$
contient 99,97% de la masse de l'atome

La densité de la matière du noyau est
de **230 000 tonnes par mm^3 !**

► Cas de la sphère dure :



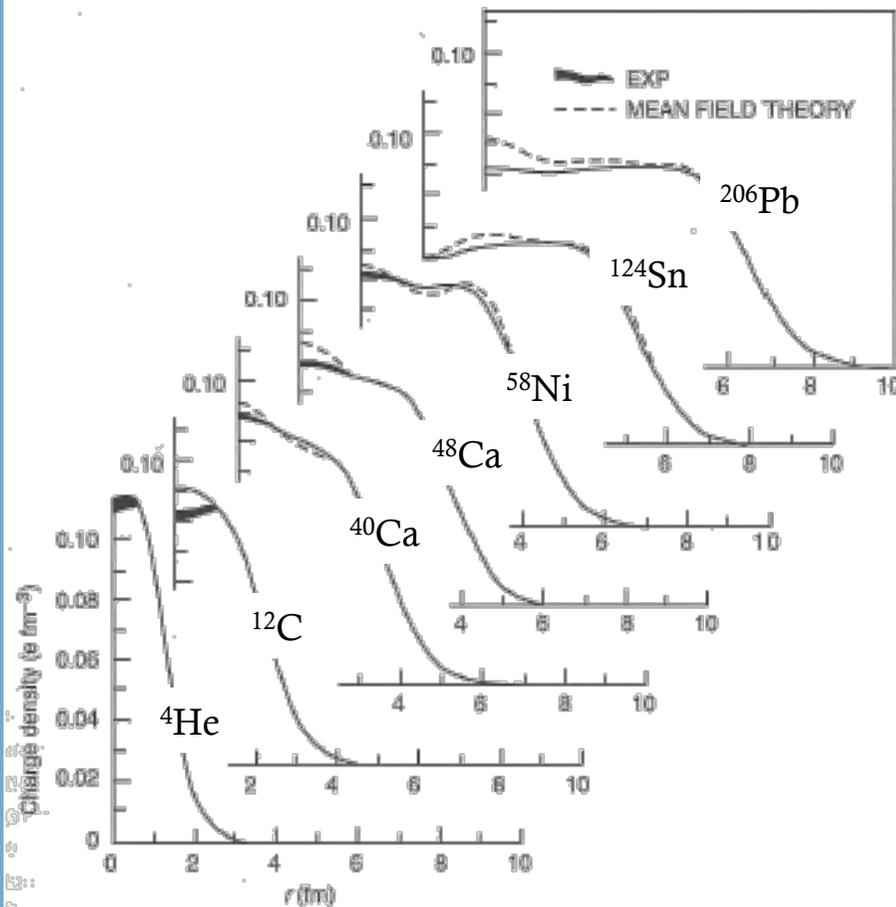


LA DENSITÉ DES NOYAUX

Volume du noyau = $A \times 7,3 \cdot 10^{-45} \text{m}^3$
 contient 99,97% de la masse de l'atome

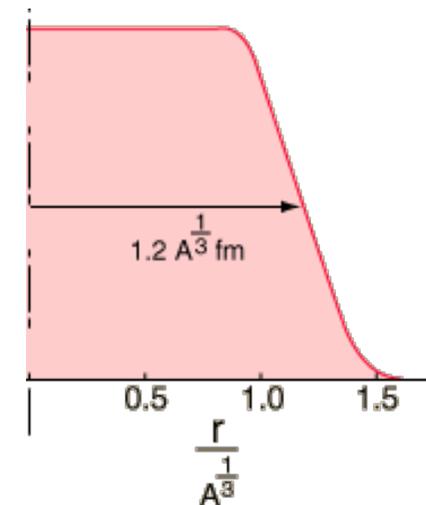
La densité de la matière du noyau est
 de **230 000 tonnes par mm^3 !**

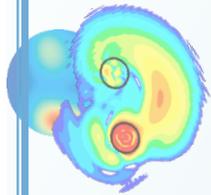
► Mesures expérimentales : noyau bords diffus



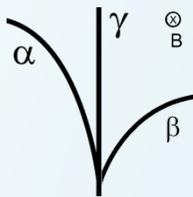
nucleus	R (fm)
^1H	1.0
^2H	2.73
^4He	2.08
^6Li	2.8
^7Li	2.8
^9Be	2.84
^{12}C	3.04
^{16}O	3.41
^{24}Mg	3.84
^{40}Ca	4.54
^{122}Sb	5.97
^{181}Ta	7.10
^{209}Bi	7.13

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{1 + e^{(r-r_0)/a}}$$

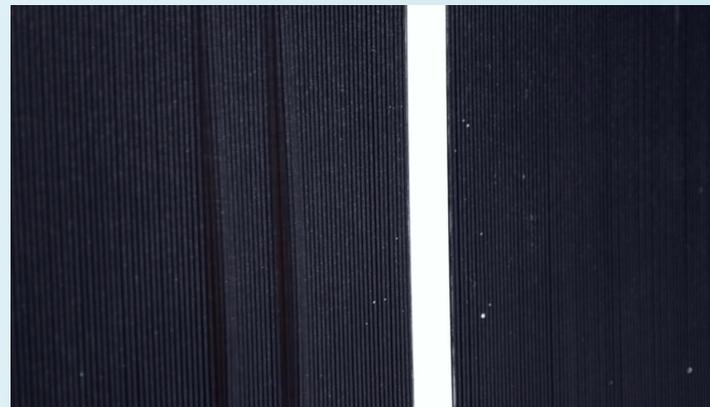


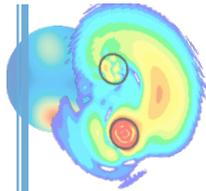


ET LES NOYAUX INSTABLES ?



- ▶ Comment on les fabrique ?
- ▶ Aux limites de la force forte... (la carte des noyaux)
- ▶ Les décroissances α β γ , qui choisit ?
- ▶ Le cas de la radioactivité alpha (impossible n'est pas quantique)





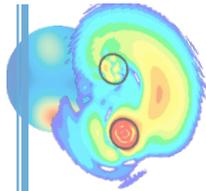
LES RADIONUCLÉIDES NATURELS

- **Famille de l'Uranium** (^{235}U , ^{238}U), du **Thorium** (^{232}Th)
 - formés à la naissance de l'Univers
 - chaîne de 42 radionucléides (13 éléments dont 9 sont instables)
- **Les radionucléides de longue durée de vie**

Nuclide	Isotopic abundance (%)	Decay mode	Half-life (y)
^{40}K	0.0117	β^-	1.26×10^9
^{87}Rb	27.83	β^-	4.88×10^{10}
^{123}Te	0.905	EC	1.3×10^{13}
^{144}Nd	23.80	α	2.1×10^{15}
^{174}Hf	0.162	α	2×10^{15}

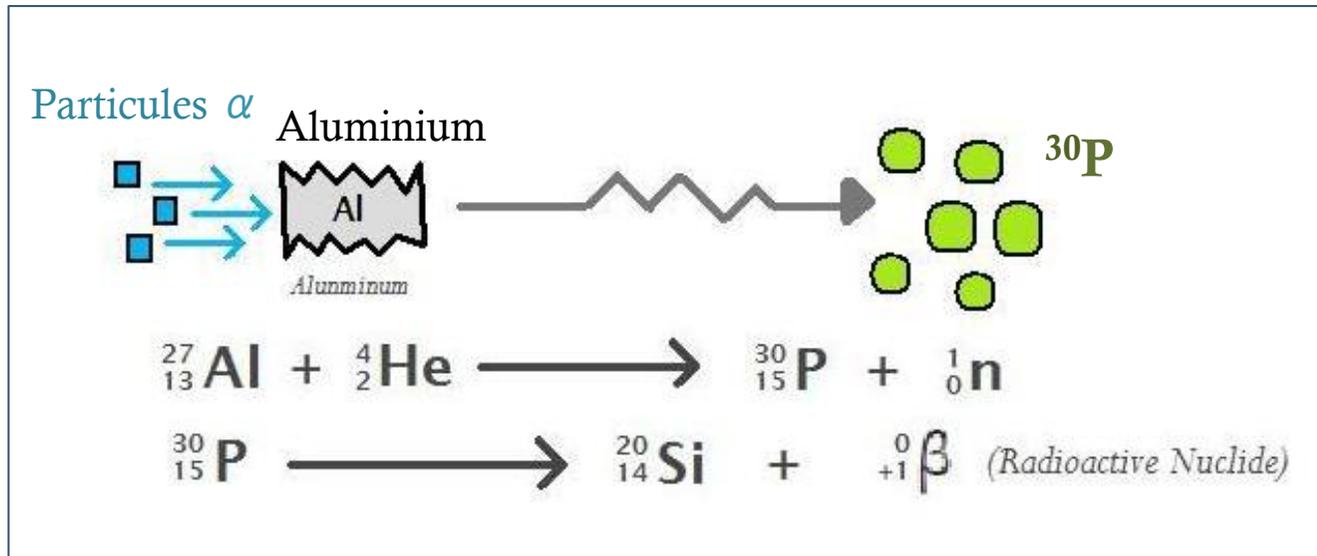
- **Les radionucléides créés par les rayons cosmiques**

Nuclide	Half-life (y)	Decay mode	Nuclide	Half-life (y)	Decay mode
^3H	12.3	beta	^7Be	0.15	EC
^{10}Be	2.5×10^6	beta	^{14}C	5730	beta
^{22}Na	2.62	EC	^{26}Al	7.4×10^5	EC
^{32}Si	710	beta	^{32}P	0.038	beta
^{33}P	0.067	beta	^{35}S	0.24	beta
^{36}Cl	3.1×10^5	beta/EC	^{39}Ar	269	beta
^{41}Ca	3.8×10^6	EC	^{129}I	1.57×10^7	beta



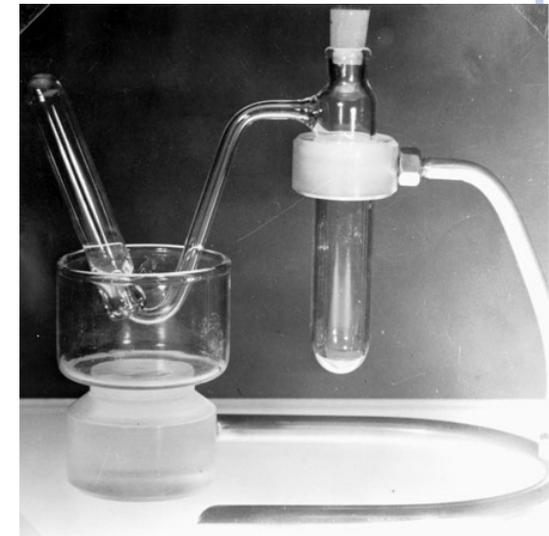
LA FABRICATION DU PREMIER RADIONUCLÉIDE ARTIFICIEL

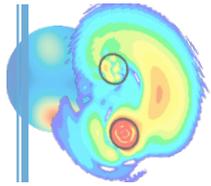
Expérience de Frédéric et Irène Joliot-Curie (1934)



« La diversité des natures chimiques, la diversité des vies moyennes de ces radioéléments synthétiques permettront sans doute des recherches nouvelles en biologie et en physicochimie. Pour mener à bien ces travaux, il sera nécessaire de disposer de quantités relativement importantes de ces radioéléments. C'est en employant des projectiles accélérés artificiellement que l'on atteindra ce but. [...] Jusqu'alors, seuls des éléments à vie relativement brève, s'étendant de la fraction de seconde à quelques mois, ont pu être obtenus. **Pour créer une quantité appréciable d'un élément à vie beaucoup plus longue, il faudrait disposer d'une source de projectiles prodigieusement intense. N'y a-t-il aucun espoir de réaliser ce nouveau rêve ?** »

F. Joliot-Curie, Discours du prix nobel



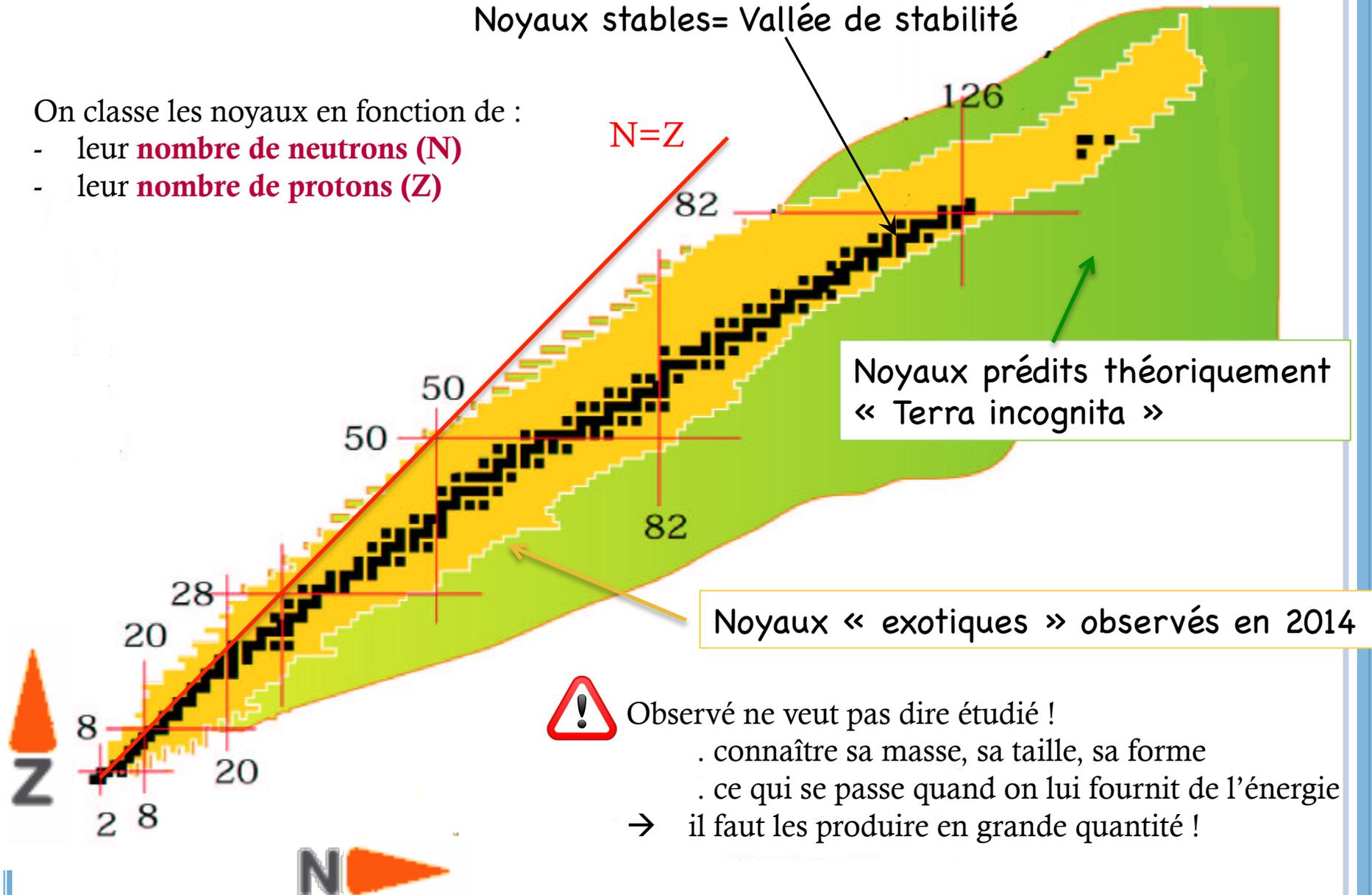


NOTRE TERRAIN DE JEU : LA CARTE DES NOYAUX (COMPLÈTE !)

Noyaux stables = Vallée de stabilité

On classe les noyaux en fonction de :

- leur **nombre de neutrons (N)**
- leur **nombre de protons (Z)**

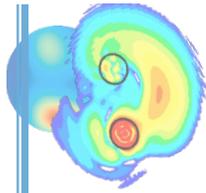


Observé ne veut pas dire étudié !

. connaître sa masse, sa taille, sa forme

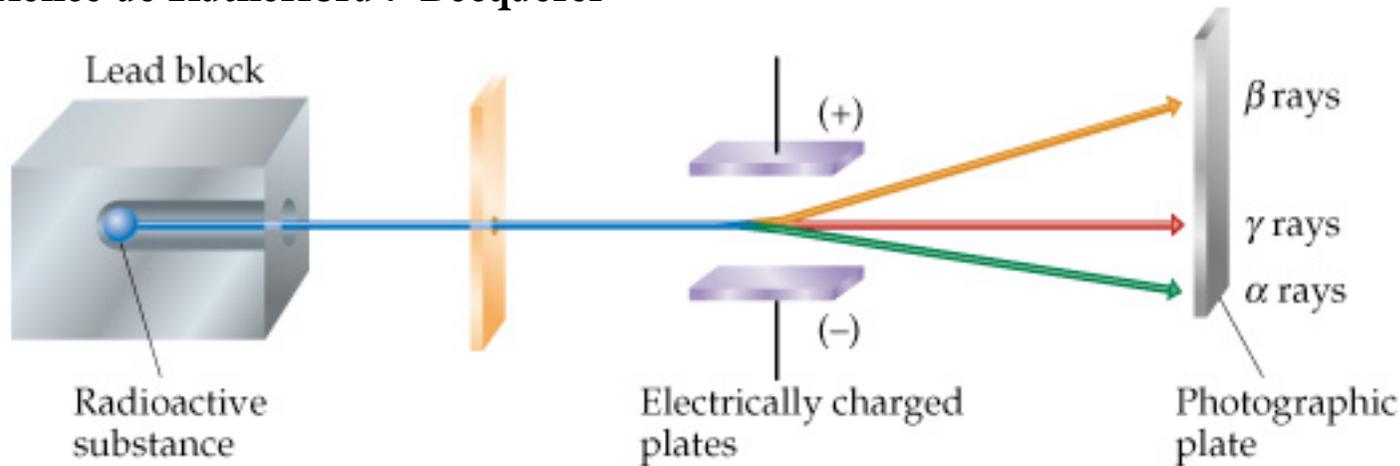
. ce qui se passe quand on lui fournit de l'énergie

→ il faut les produire en grande quantité !



DÉCOUVERTE DES DIFFÉRENTS TYPES DE RAYONNEMENTS

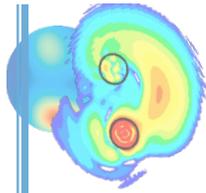
Expérience de Rutherford / Becquerel



- Les rayonnements α et β sont déviés (dans des sens opposés)
 - les rayonnements β sont des électrons
 - les rayonnements α ont un rapport masse/charge= 2, ce sont des noyaux d'He
- Les rayonnements γ ne sont pas déviés (similaire aux rayons X)
- Les rayons β ont les mêmes propriétés que les rayons cathodiques

→ Tous les noyaux sont formés de particules α et d'électrons

« (...) les rayons α sont donc constitués de corps chargés positivement projetés à grande vitesse (...) La valeur de e/m , rapport de la charge du porteur à sa masse, est de l'ordre de 6.10^3 (...) Or $e/m = 104$ pour l'atome d'hydrogène lors de l'électrolyse de l'eau. La particule qui constitue les rayons α se comporte donc comme si sa masse était du même ordre que celle de l'atome d'hydrogène. » Rutherford et Soddy



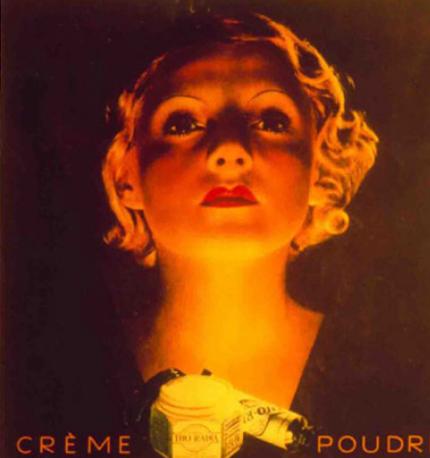
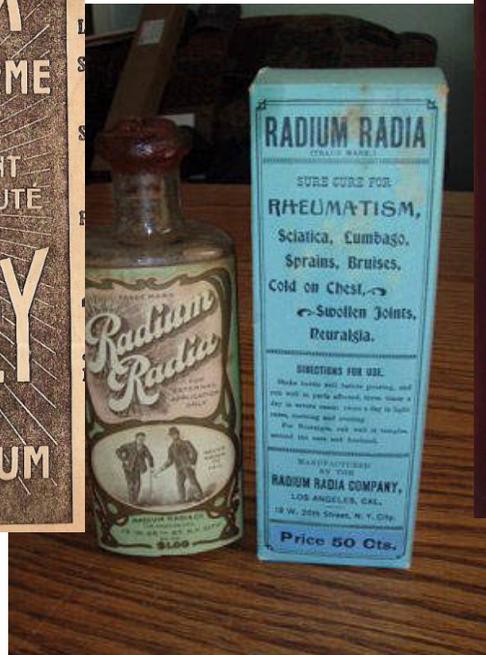
LA RADIOACTIVITÉ C'EST TONIQUE !

LE RADIUM
RÉGÈNÈRE L'ÉPIDERME

PLUS DE RIDES
TEINT VELOUTÉ



LA CRÈME RAMEY
RADIACÉE
CONTIENT DU RADIUM



CRÈME POUVRE
THO-RADIA
EMBELLISSANTES PARCE QUE CURATIVE
à base de thorium et de radium selon la formule de
DOCTEUR ALFRED CURIE
EXCLUSIVEMENT CHEZ LES PHARMACIENS
DROGUE GRATUITE SUR DEMANDE À THO-RADIA, 20 RUE DES CAROUIES, PARIS

« Un grain du mystérieux radium sera montré à l'exposition universelle. Sa puissance est inimaginable. Avec ce métal, tous les arsenaux du monde pourraient être détruits. Il pourrait rendre la guerre impossible ! »

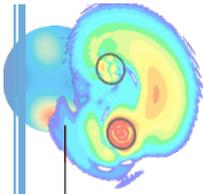
St-Louis Post Dispatch

On trouve chez
RADIGUET & MASSIOT
Constructeurs d'Instruments pour les Sciences
13, 15, Boul. des Filles-du-Calvaire
(Paris, 3^e)

**LE SPINTHARISCOPE
de Crookes**

Appareil de démonstration permettant de voir directement sur un écran les effets lumineux du bombardement des émissions spontanées du **RADIUM**.
Voir description dans le journal le **RADIUM** de février, n° 2.

Envoi franco contre mandat-poste de 25 francs.

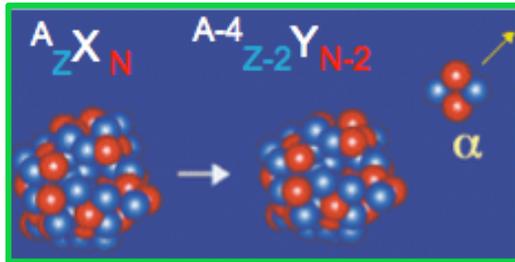


CARTE DE DÉSINTÉGRATIONS DES NOYEAUX

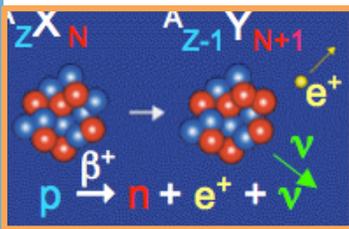
► Condition de décroissance :

$$M(\text{Noyau Père}) > M(\text{Noyau fils}) + M(\alpha, \beta, p, n, \dots)$$

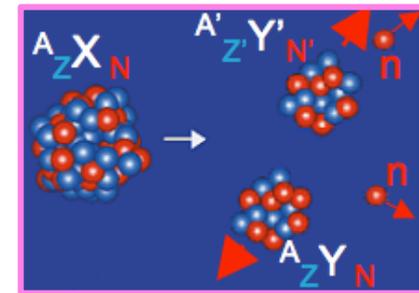
$$Q = M(\text{Père}) - [M(\text{Fils}) + M(\alpha, \beta, \dots)] > 0$$



Désintégration α

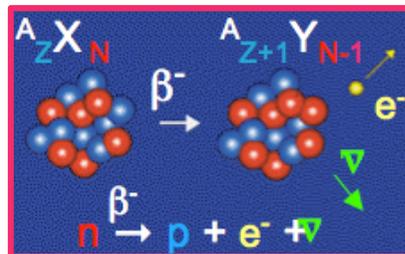


Désintégration β^+
& capture e^-

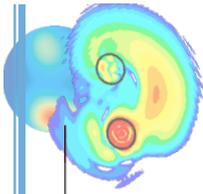


fission spontanée

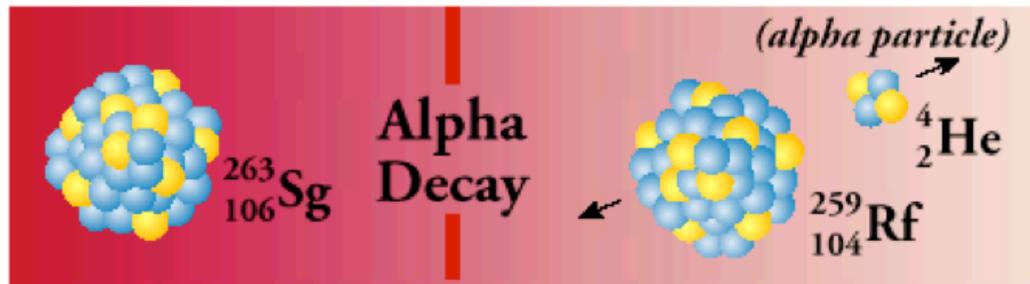
Désintégration β^-



EMISSION	
■	STABLE
■	α ALPHA
■	p PROTON
□	EC e^- CAPTURE
■	β^+ POSITRON
■	β^- ELECTRON
■	n NEUTRON
■	SF (n)
●	FERTILE (SF)

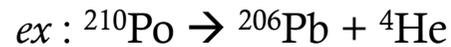


CARTE DE DÉSINTÉGRATIONS DES NOYAUX



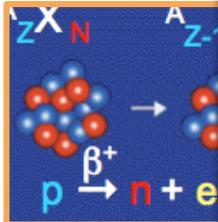
$$Q = B(N-2, Z-2) - B(N, Z) + B({}^4\text{He}) = B(\text{fils}) + B(\text{père}) - B({}^4\text{He})$$

zone favorable : $B(N-2, Z-2) - B(N, Z) > 0$
 $\rightarrow B(A-4)/(A-4) \geq B(A)/A$

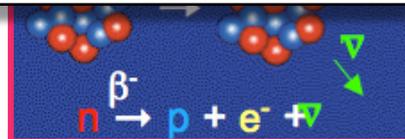


${}^{210}\text{Po}$ $Z/N = 84/126 = 0.667$

${}^{206}\text{Pb}$ $Z/N = 82/124 = 0.661$



Désintégration
& capture

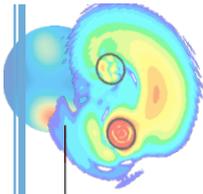


■ n NEUTRON
 ■ SF (n)
 ● FERTILE (SF)

ée

▼
 n
 ▲

■ SF (n)
 ● FERTILE (SF)

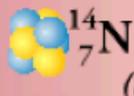


CARTE DE DÉSINTÉGRATIONS DES NOYAUX



$^{14}_6\text{C}$

Beta Minus Decay



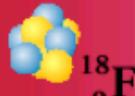
$^{14}_7\text{N}$
(beta particle)



$\bar{\nu}_e$
 e^-

$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$

$^A_Z\text{X} \rightarrow ^A_{Z+1}\text{Y} + e^- + \bar{\nu}$



$^{18}_9\text{F}$

Beta Plus Decay



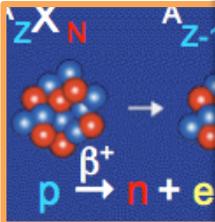
$^{18}_8\text{O}$
(beta particle)



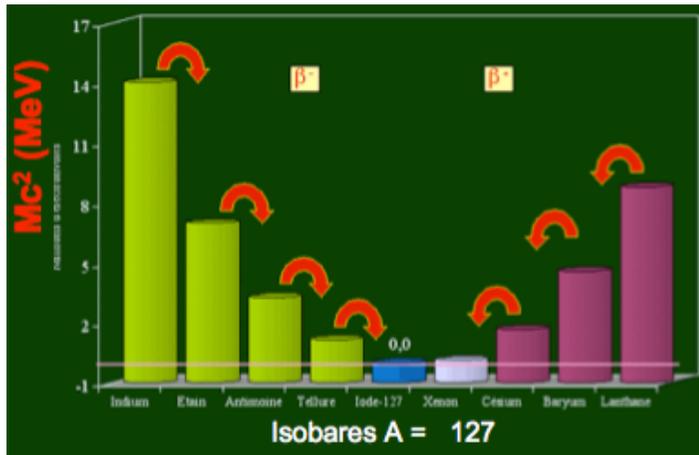
ν_e
 e^+

$p \rightarrow n + e^+ + \nu$

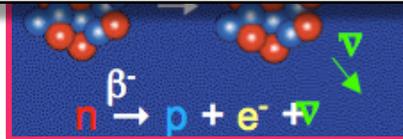
$^A_Z\text{X} \rightarrow ^A_{Z-1}\text{Y} + e^+ + \nu$



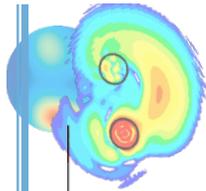
Désintégration
& capture



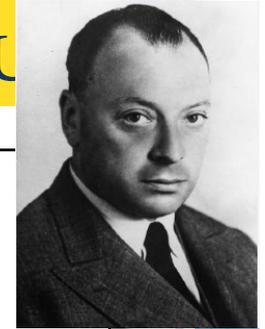
- ▶ Le proton libre ne décroît pas (d'après nos connaissances)
 $m_p < m_n + m_e$
- ▶ Le neutron libre décroît en proton avec un temps de $\frac{1}{2}$ vie de **10,5 min**



■ n NEUTRON
 ■ SF (n)
 ● FERTILE (SF)

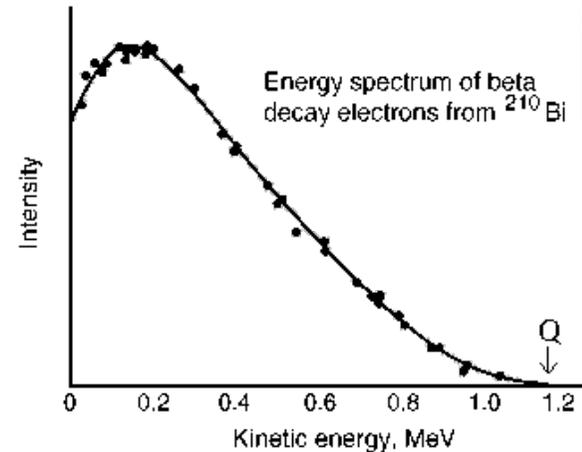


CARTE DE DÉSINTÉGRATIONS DES NOYAU



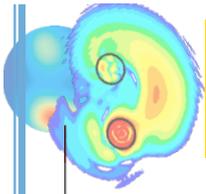
Chers dames et messieurs radioactifs,

*Je vous prie d'écouter avec beaucoup de bienveillance le messenger de cette lettre. Il vous dira que pour pallier la « mauvaise » statistique des noyaux N et Li-6 et le spectre bêta continu, j'ai découvert un remède inespéré pour sauver les lois de conservation de l'énergie et les statistiques. **Il s'agit de la possibilité d'existence dans les noyaux de particules neutres de spin**, obéissant au principe d'exclusion, mais différentes des photons par ce qu'elles ne se meuvent pas à la vitesse de la lumière, et que j'appelle **neutrons (neutrinos)**. La masse des neutrons devrait être du même ordre de grandeur que celle des électrons et ne doit en aucun cas excéder 0,01 de la masse du proton. **Le spectre bêta serait alors compréhensible si l'on suppose que pendant la désintégration bêta, avec chaque électron est émis un neutron**, de manière que la somme des énergies du neutron et de l'électron est constante....*



J'admets que mon remède puisse paraître invraisemblable, car on aurait dû voir ces neutrons bien plus tôt si réellement ils existaient. Mais seul celui qui ose gagne, et la gravité de la situation, due à la nature continue du spectre, est éclairée par une remarque de mon honoré prédécesseur, Monsieur Debye, qui me disait récemment à Bruxelles : « Oh ! Il vaut mieux ne pas y penser du tout, comme pour les nouveaux impôts ». Dorénavant on doit discuter sérieusement toute voie d'issue. Ainsi, cher peuple radioactif, examinez et jugez. Malheureusement je ne pourrai être moi-même à Tübingen, ma présence étant indispensable ici pour un bal qui aura lieu pendant la nuit du 6 au 7 décembre.

*Votre serviteur le plus dévoué,
W. Pauli.*

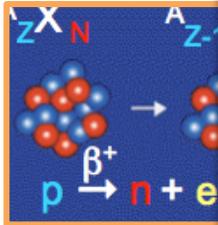


CARTE DE DÉSINTÉGRATIONS DES NOYAUX

Beta Plus Decay

$p \rightarrow n + e^+ + \nu$

$A_Z X \rightarrow A_{Z-1} Y + e^+ + \nu$



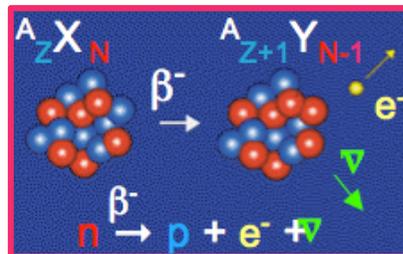
Capture électronique

$A_Z X + e^- \rightarrow A_{Z-1} Y + \nu$

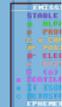
Dés
& ca

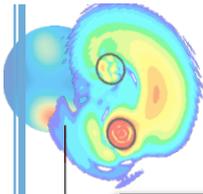
Compétition entre décroissance beta plus et capture électronique

Désintégration β^-

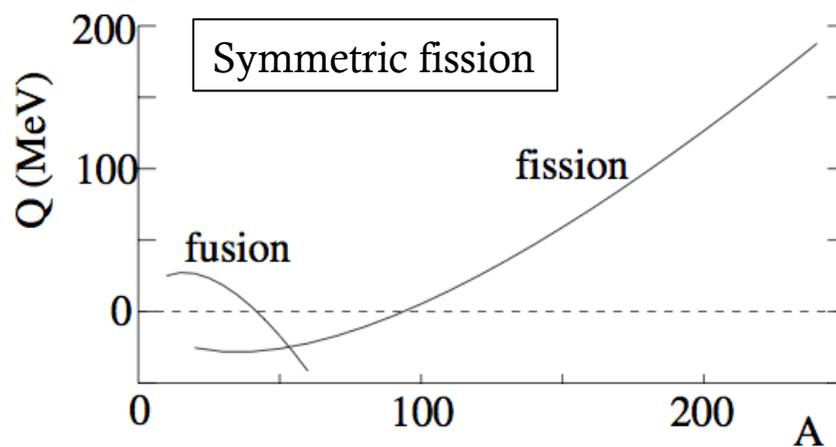
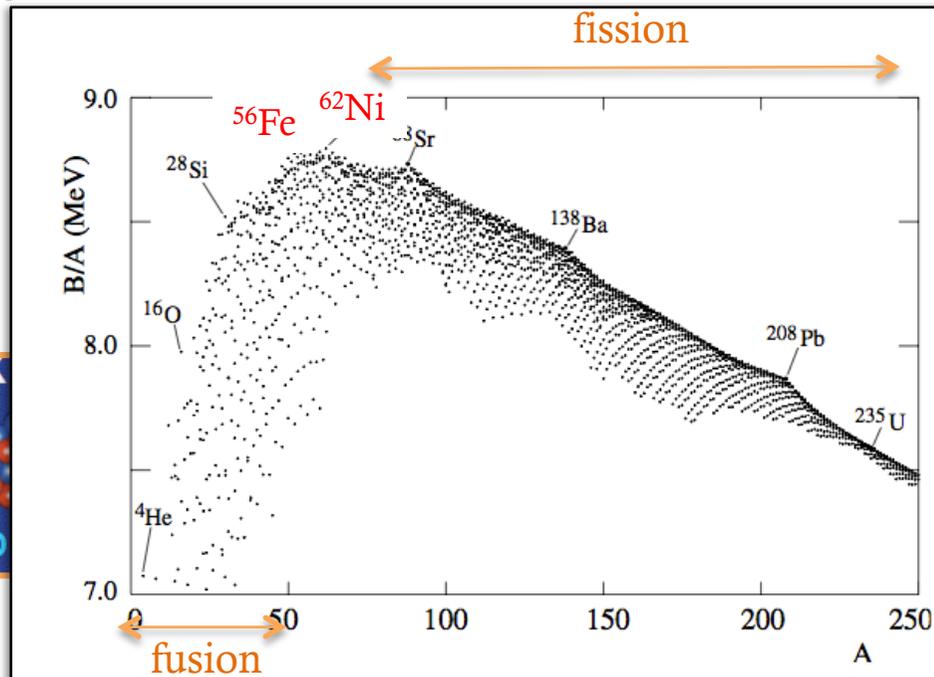


- α ALPHA
- p PROTON
- EC e⁻ CAPTURE
- β^+ POSITRON
- β^- ELECTRON
- n NEUTRON
- 5f (n)
- FERTILE (5f)





CARTE DE DÉSINTÉGRATIONS DES NOYAUX



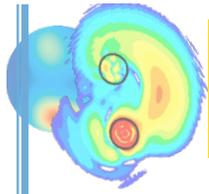
Fission spontanée

$B(A) > B(A)$: lourds
→ favorise la perte de matière
(fission, alpha)

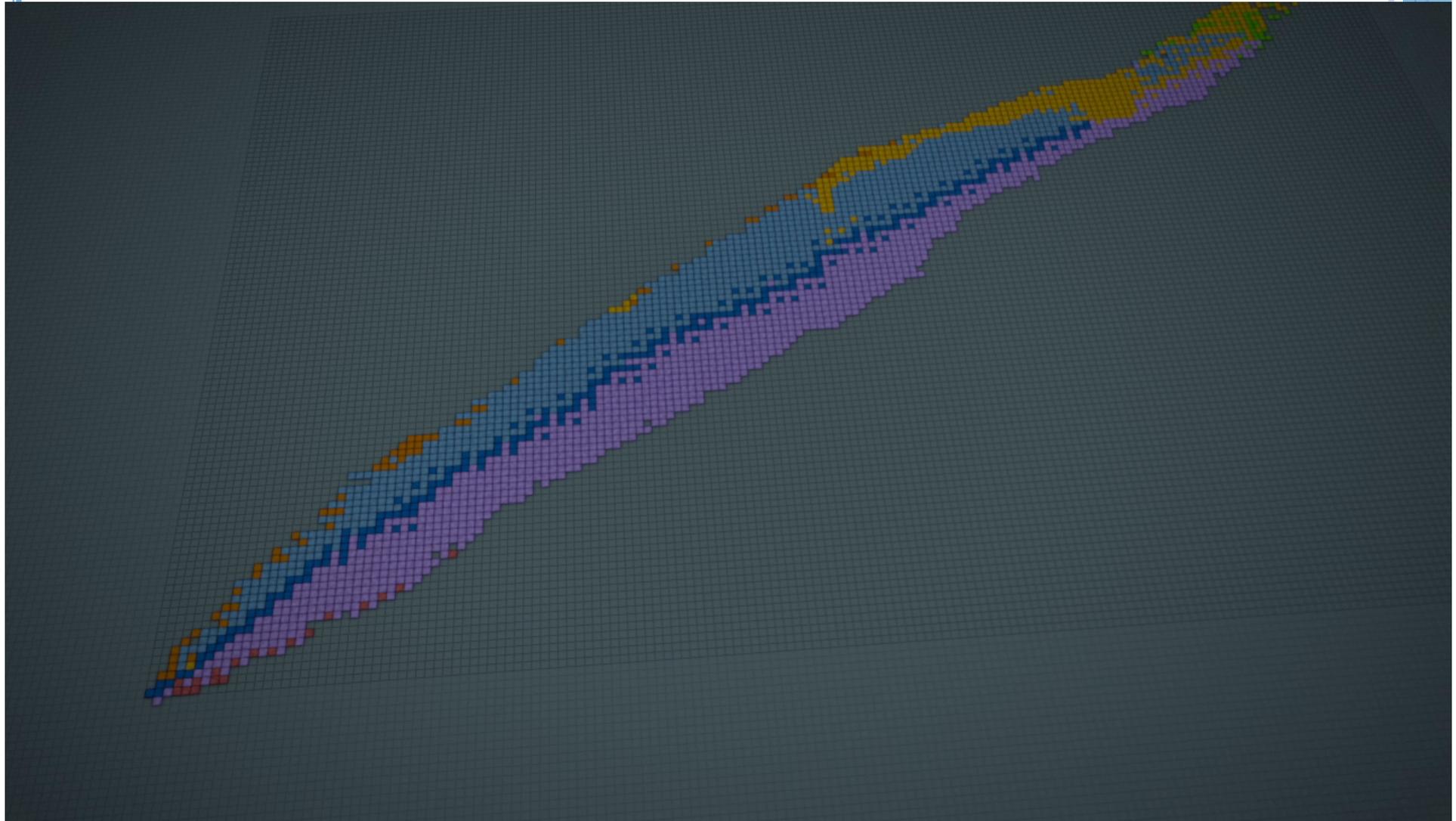
$B(A) > B(A)$: légers
→ favorise la prise de matière
(fusion)

N.B. : pas de fusion spontanée
car barrière coulombienne

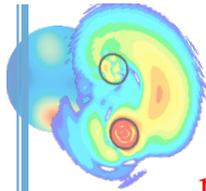
fission $A \sim 240$



CARTE DE DÉSINTÉGRATIONS DES NOYAUX

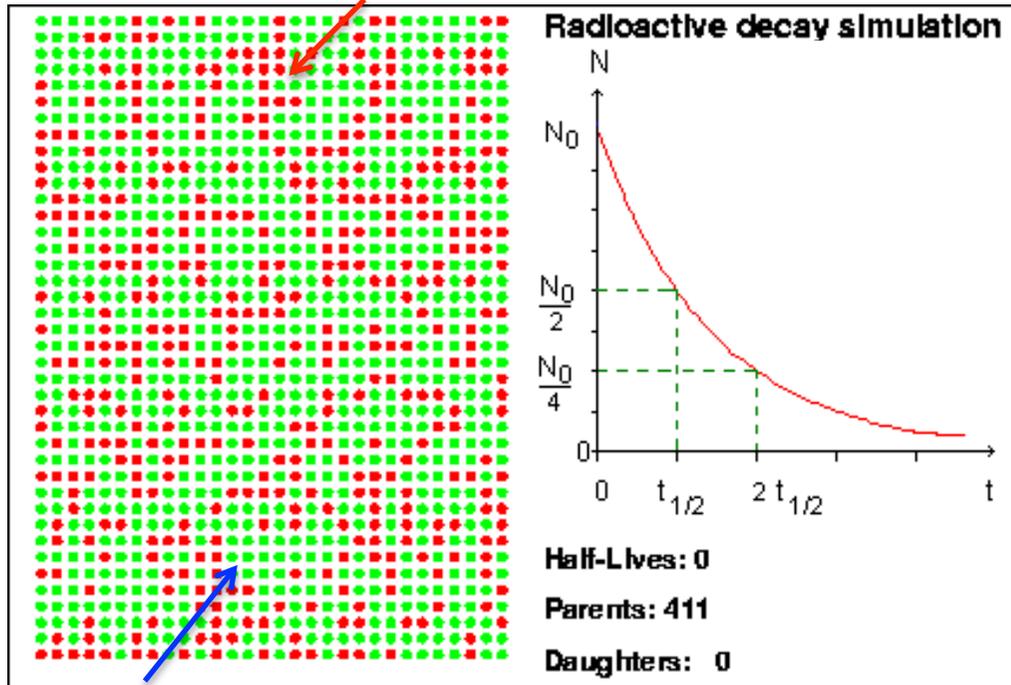


source : <http://irfu.cea.fr/la-vallee-de-stabilite/>



LA DÉCROISSANCE RADIOACTIVE

noyaux radioactifs (père)



noyaux fils

Lors de la décroissance sont conservés :

- l'énergie
- la charge électrique
- le nombre de nucléons
- ...

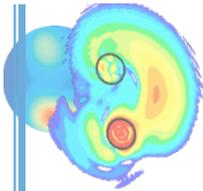
Phénomène statistique (aléatoire) !

La probabilité qu'un noyau donné décroisse pendant un temps donné ne dépend pas :

- de son âge
- de la façon dont il a été créé

On ne peut pas prédire la durée de vie exacte d'un noyau donné mais seulement **la durée de vie (moyenne) d'un échantillon contenant de nombreux isotopes du même noyau.**

- ▶ Si on a N noyaux X à l'instant t , le nombre de désintégration (dN) pendant dt est proportionnel à N et dt soit : $dN = -\lambda N dt$ (λ est la constante radioactive)
- ▶ Nombre de noyaux à l'instant t : $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$
- ▶ **Temps de demi-vie :**
temps nécessaire pour que la moitié des noyaux d'un échantillon aient décru $T_{1/2} = \ln(2)/\lambda$
- ▶ **Activité :** nombre de désintégrations par unité de temps : $A(t) = \lambda N(t)$

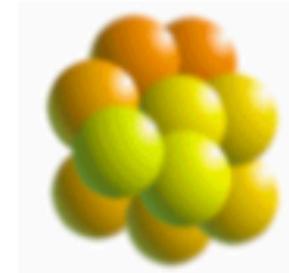


POURQUOI UNE DURÉE DE VIE ?

Condition nécessaire d'une décroissance

$$M(\text{Noyau Père}) > M(\text{Noyau fils}) + M(\alpha, p, n, \dots)$$

$$Q = M(\text{Père}) - [M(\text{Fils}) + M(\alpha, \dots)] > 0$$



Si énergétiquement décroissance possible pourquoi pas immédiatement ????

Pour α :

Symétrie par renversement du sens du temps (le film à l'envers)

émission $\alpha \Leftrightarrow$ fusion avec un α

D'où

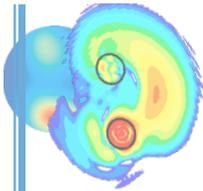
fusion spontanée impossible \Leftrightarrow répulsion coulombienne des noyaux

\Leftrightarrow émission α spontanée impossible

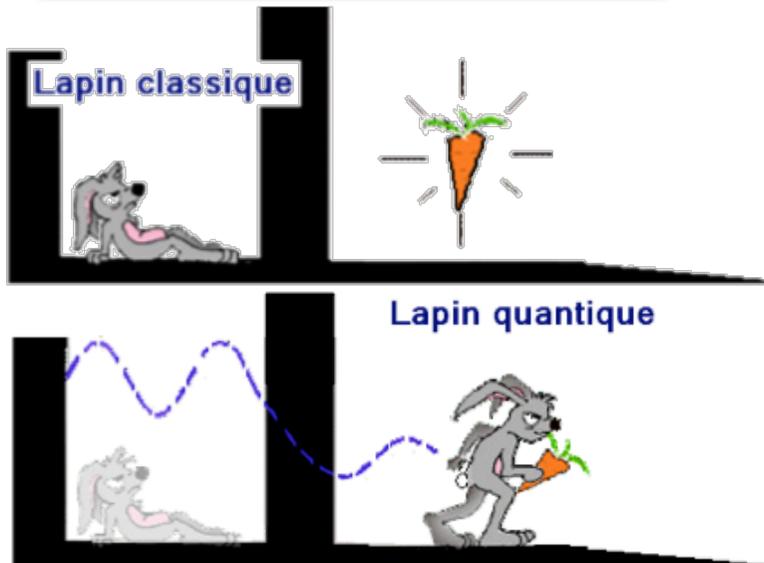
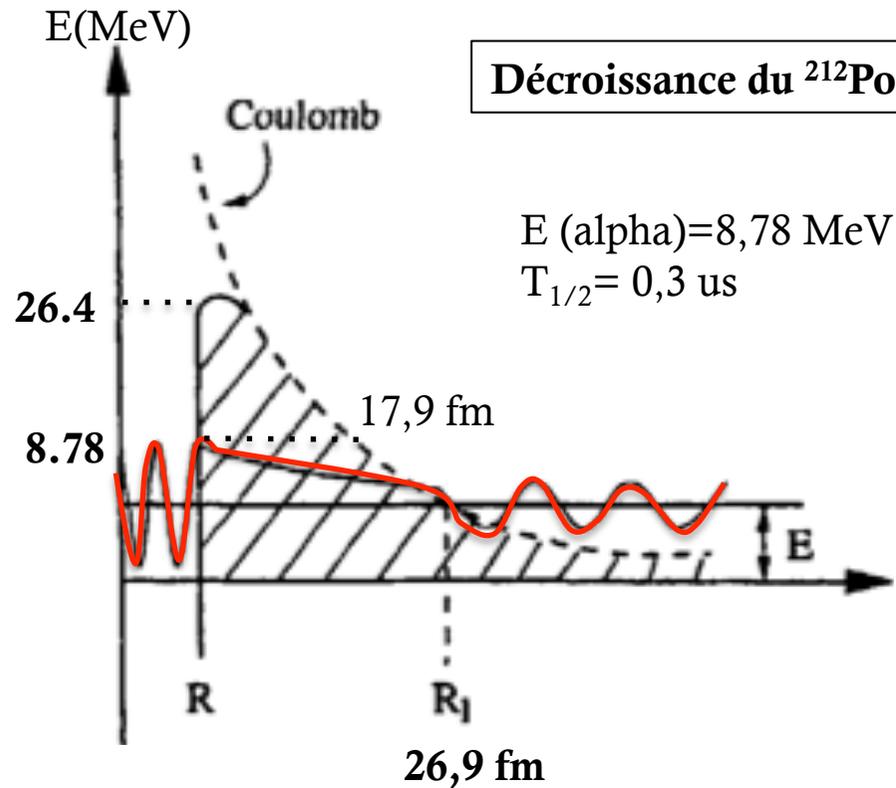
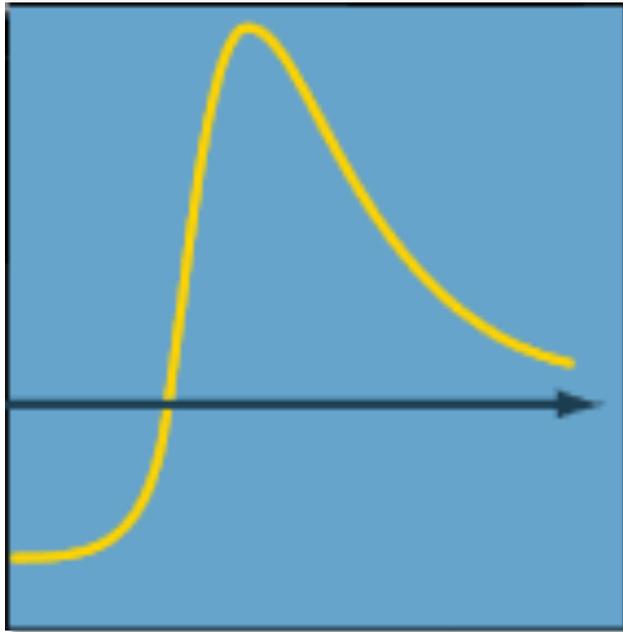
Mais : classiquement barrière trop haute

\Rightarrow effet quantique de traversée de barrière : effet tunnel

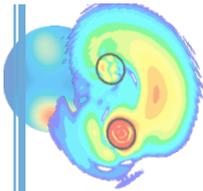
Pour β : pas de renversement du sens du temps, pas de β pré-formé dans le noyau
la durée vient du fait que l'événement est peu probable car interaction **faible**



IMPOSSIBLE N'EST PAS QUANTIQUE

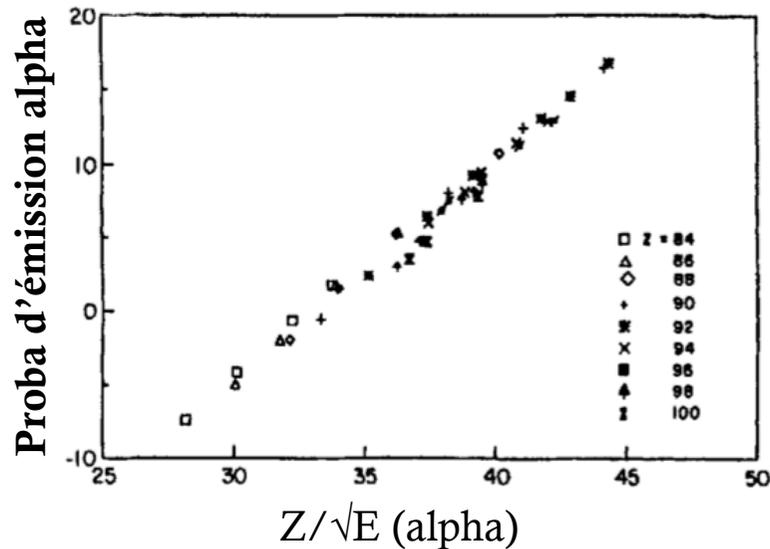
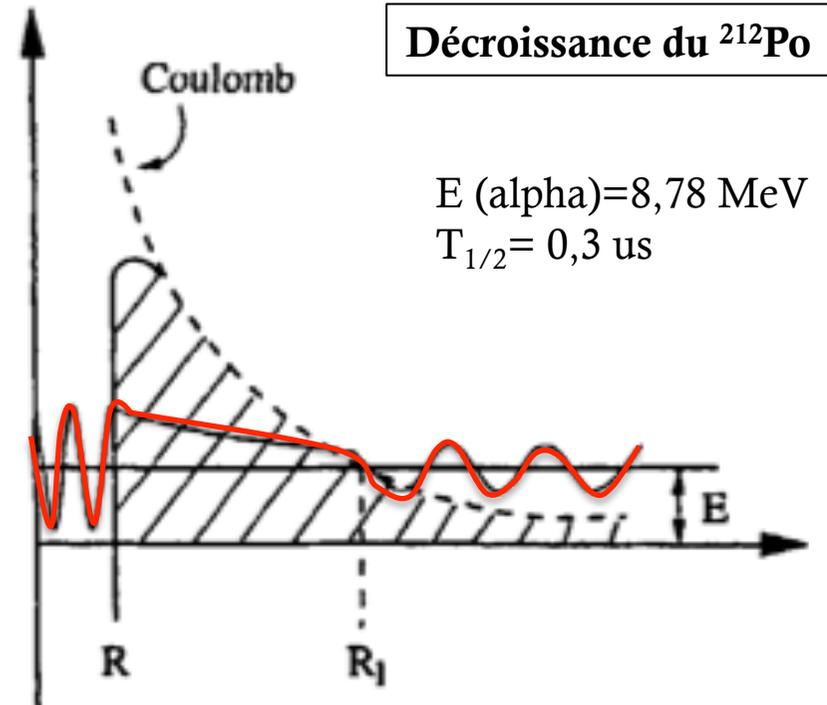


Hauteur barrière	26.4 MeV
Rayon où la barrière tombe à l'énergie de l'alpha	26,9 fm
Largeur de la barrière vue par l'alpha	17,9 fm
Fréquence de collision de l'alpha sur la barrière	$1,1 \cdot 10^{21}/\text{s}$

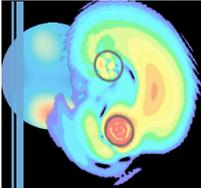


IMPOSSIBLE N'EST PAS QUANTIQUE

Emetteur alpha	E(MeV)	$T_{1/2}$
^{206}Po	5.22	8,8 jours
^{208}Po	5.11	2,90 ans
^{210}Po	5.31	138 j
^{212}Po	8.78	0,30 us
^{214}Po	7,68	164 us
^{228}U	6,69	9,1 mois
^{230}U	5,89	21 j
^{232}U	5,32	72 a
^{234}U	4,77	$2,47 \cdot 10^5 \text{a}$



Probabilité d'émission alpha =
Probabilité de préformation de l'alpha
x Fréquence de collision sur la barrière
x Probabilité de pénétrer la barrière

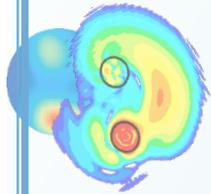


INTERMÈDE QUANTIQUE

L'appartement quantique – L'effet Tunnel

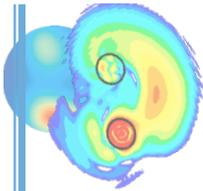


source : Natacha Poutoux



COMMENT MODÉLISER LE NOYAU ? (I)

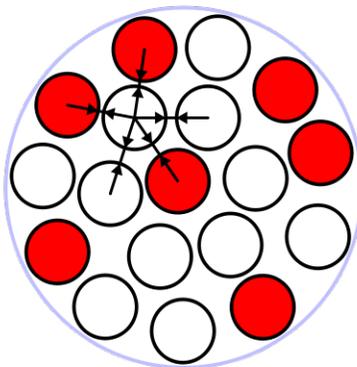
- ▶ **L'approche macrosocopique**
 - le modèle de la goutte liquide
 - succès & limites
- ▶ **Aujourd'hui ?**



COMMENT MODÉLISER LE NOYAU ?

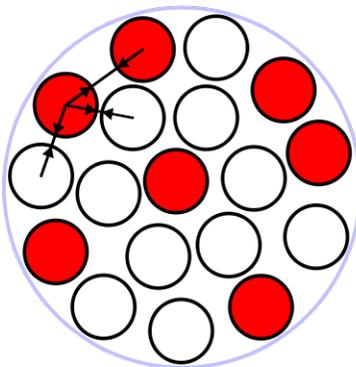
UNE PREMIÈRE APPROCHE (MACROSCOPIQUE) : LA GOUTTE LIQUIDE

$$E_B = a_V A - a_S A^{2/3} - a_C \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_A \frac{(A - 2Z)^2}{A}$$



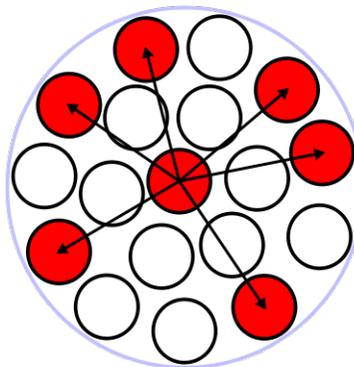
Volume

*pas de compression
des nucléons*



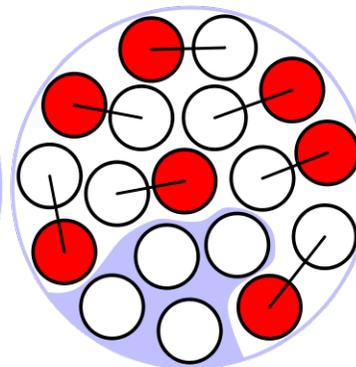
Surface

*nucléons à la
surface ont moins
de liaisons*



Coulomb

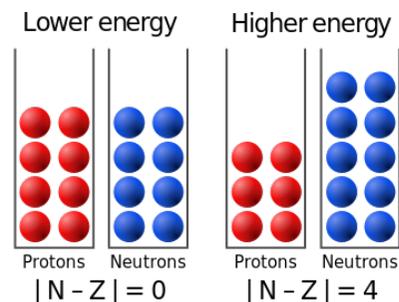
*répulsion
coulombienne*



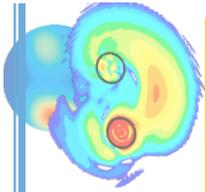
Asymmetry

$$A - 2Z = N - Z$$

$$A = 16$$



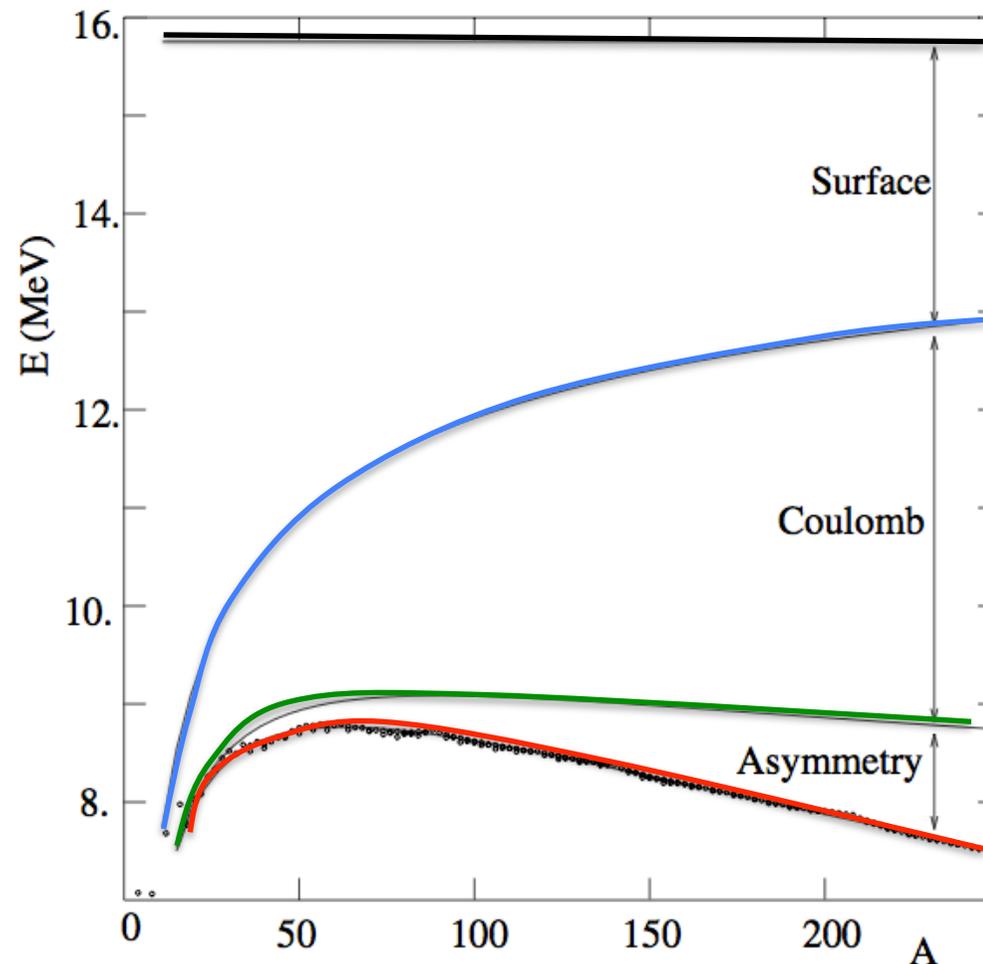
fission !

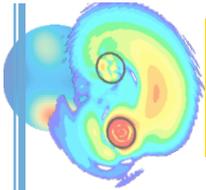


COMMENT MODÉLISER LE NOYAU ?

UNE PREMIÈRE APPROCHE (MACROSCOPIQUE) : LA GOUTTE LIQUIDE

$$E_B = a_V A - a_S A^{2/3} - a_C \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_A \frac{(A - 2Z)^2}{A} - \delta(A, Z)$$

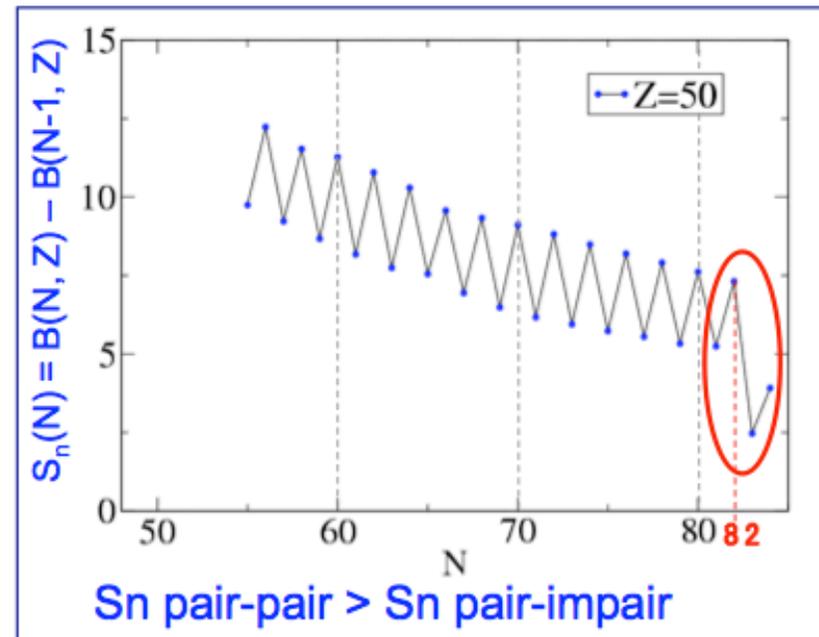
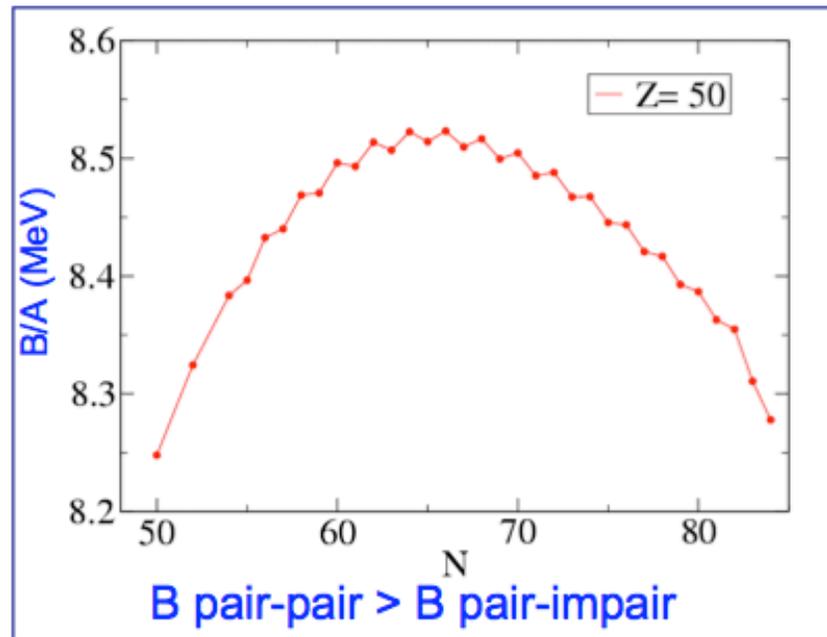




UN PETIT DÉTAIL : L'EFFET D'APPARIEMENT !

$B_{\text{pair-pair}} > B_{\text{pair-impair}} > B_{\text{impair-impair}}$

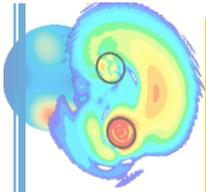
Illustration avec isotopes d'étain ($Z=50$ pair):



S_n est l'énergie de séparation d'1 neutron, car nécessaire pour libérer le "dernier" neutron

Fluctuations systématiques par rapport à la tendance générale :
(idem en Z pour N fixé)

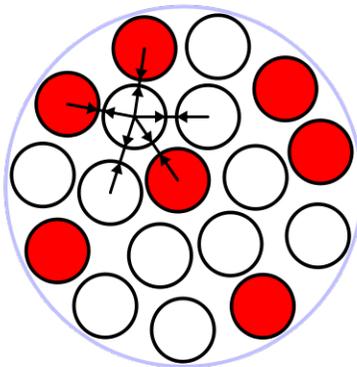
⇒ Nombre impair diminue l'énergie de liaison, les nucléons en # pairs sont + liés



COMMENT MODÉLISER LE NOYAU ?

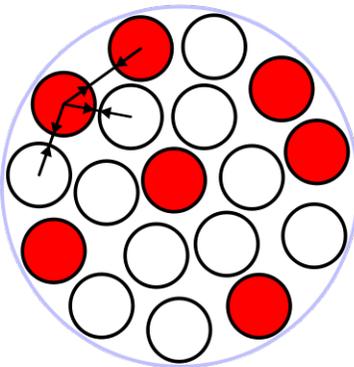
UNE PREMIÈRE APPROCHE (MACROSCOPIQUE) : LA GOUTTE LIQUIDE

$$E_B = a_V A - a_S A^{2/3} - a_C \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_A \frac{(A - 2Z)^2}{A} - \delta(A, Z)$$



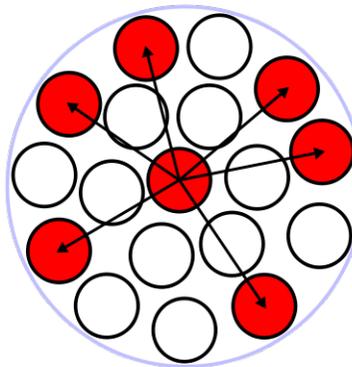
Volume

*pas de compression
des nucléons*



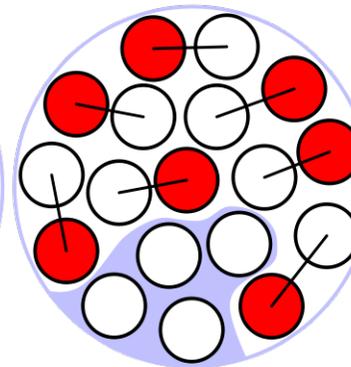
Surface

*nucléons à la
surface ont moins
de liaisons*



Coulomb

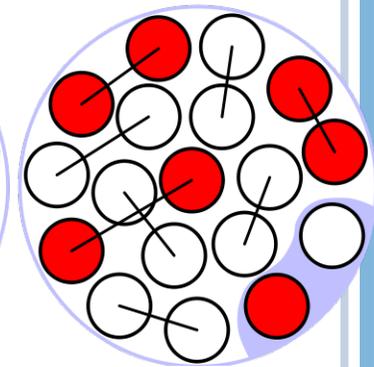
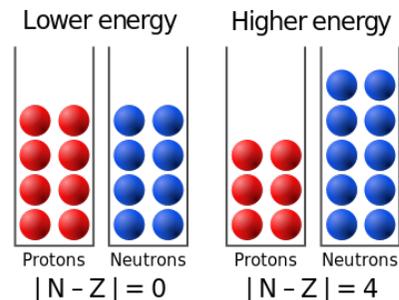
*répulsion
coulombienne*



Asymmetry

$$A - 2Z = N - Z$$

$$A = 16$$

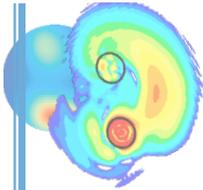


Appariement

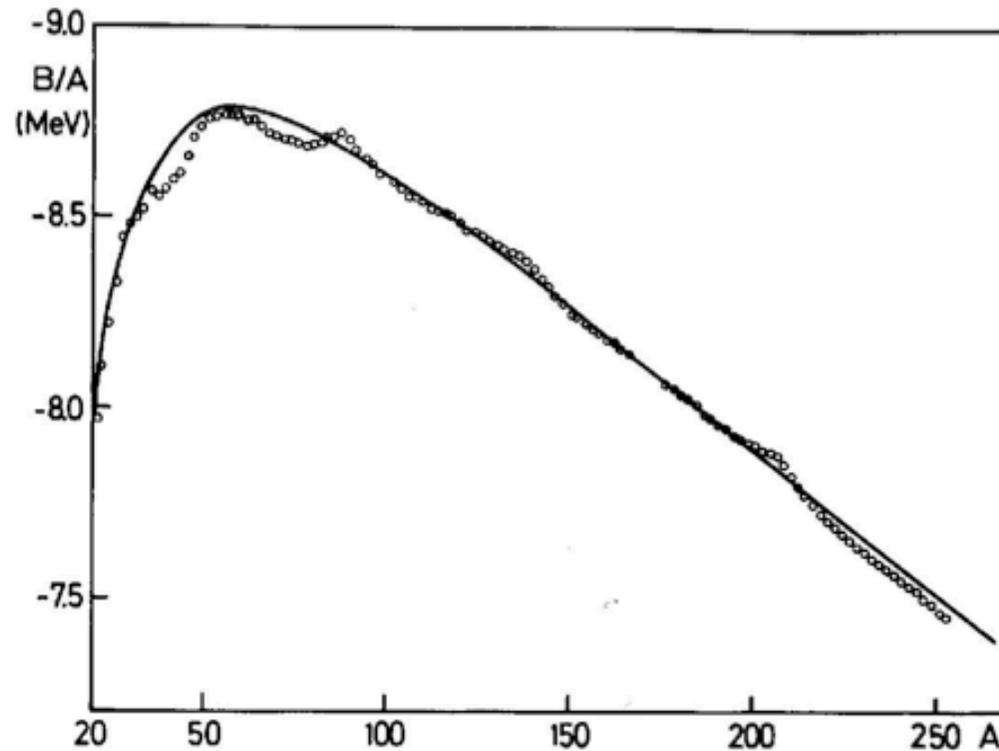
$$\delta(A, Z) = \begin{cases} +\delta_0 & Z, N \text{ pair} \\ 0 & A \text{ impair} \\ -\delta_0 & Z, N \text{ impair} \end{cases}$$



fission !



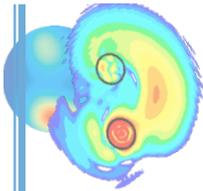
SUCCÈS ...



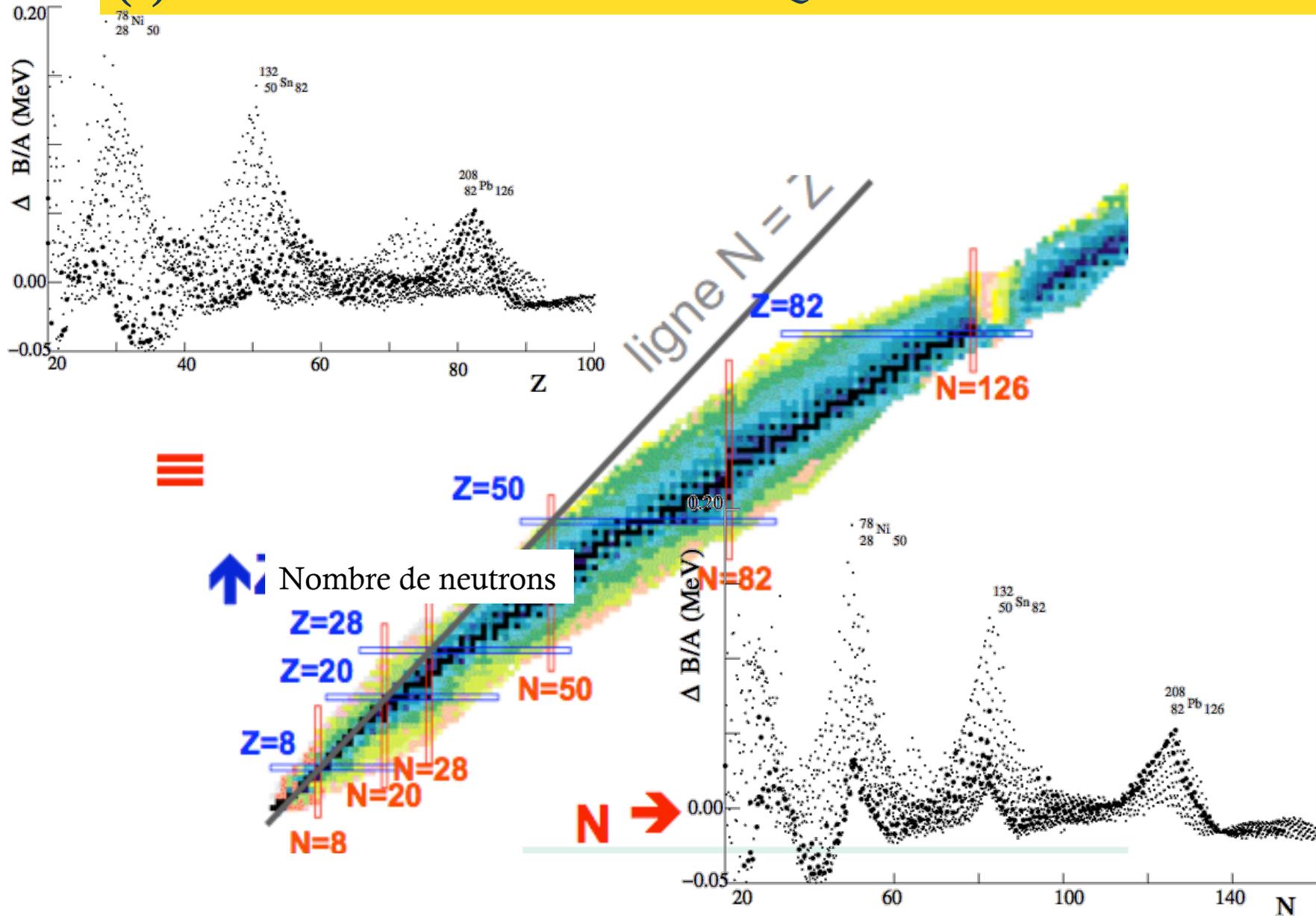
- valeurs expérimentales
- courbe calculée avec formule goutte liquide

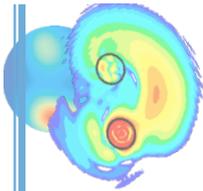
Figure 1.2. Experimental values of B/A for β -stable odd- $A(o)$ nuclei and the calculated curve using a mass formula similar to Eq. (1.4). (From [Ho 75].)

→ Toujours étudié pour étudier des collisions de noyaux à haute énergie où la structure des noyaux intervient peu...

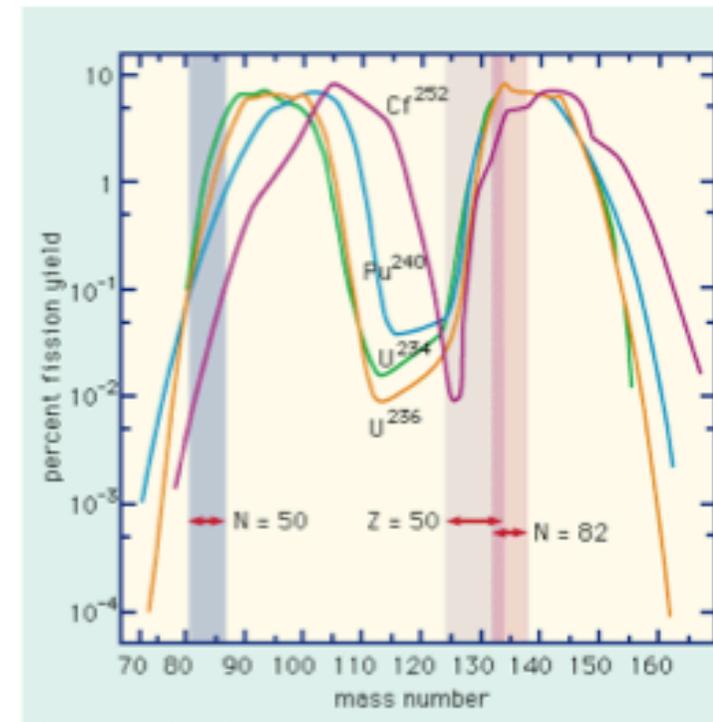
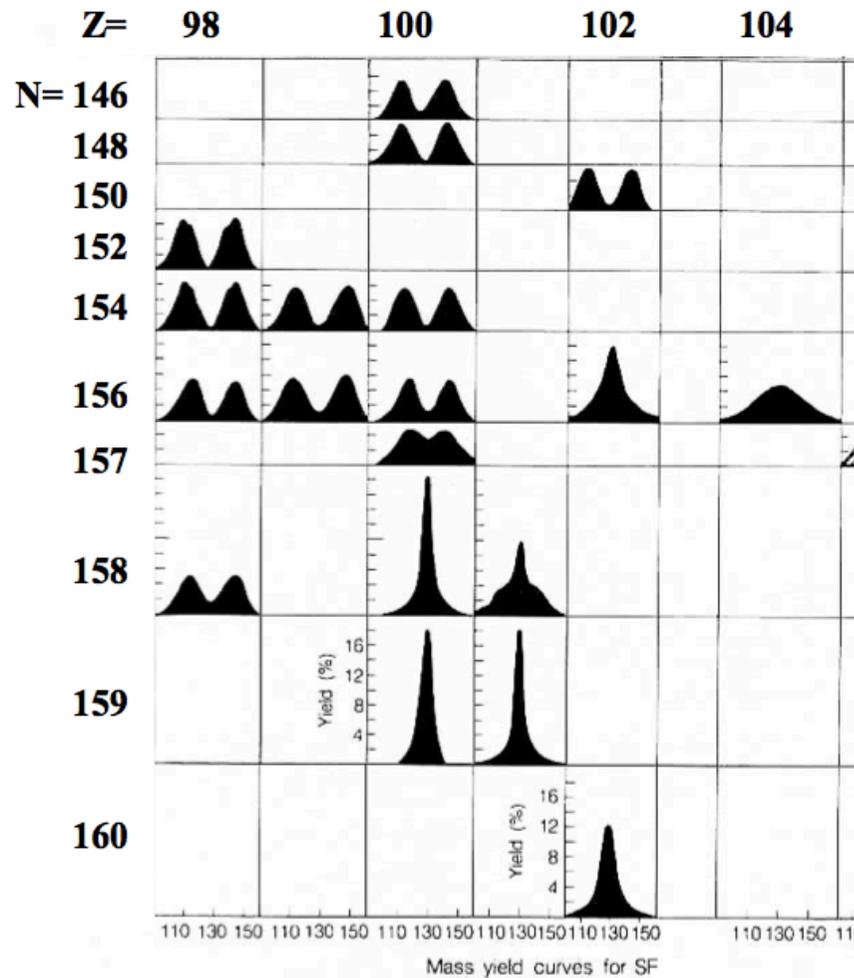


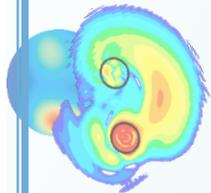
SUCCÈS & LIMITES : (I) EFFETS NON MACROSCOPIQUES





SUCCÈS ET LIMITES : (II) LA FISSION N'EST PAS SYMÉTRIQUE !!

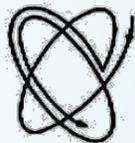




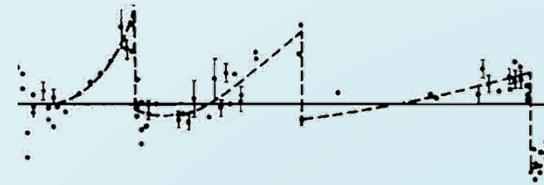
COMMENT MODÉLISER LE NOYAU ? (II)

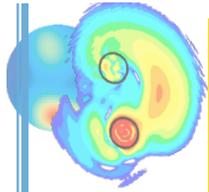


- ▶ **Le modèle de Fermi**
- ▶ **La recherche de motifs répétitifs**
- ▶ **L'approche microscopique**



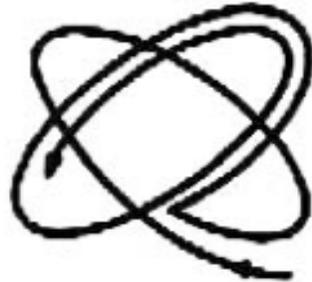
- le modèle en couches
- succès & limites
- ▶ **Les approches de champ moyen**





MOUVEMENT DES NUCLÉONS DANS LE NOYAU, ORDRE OU CHAOS ?

- ▶ **2 approches** pour les théories du noyau
 - ▶ **Modèles de particules indépendantes** soumise à une interaction phénoménologique
 - modèle de Fermi
 - modèle en couches
 - modèles de champ moyen
 - ▶ **Modèles où on calcule seulement un nombre N de nucléons en interaction**
 - modèles ab-initio
 - modèles en couche avec un coeur

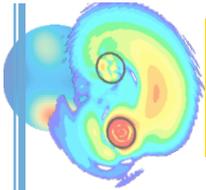


Le modèle en couches

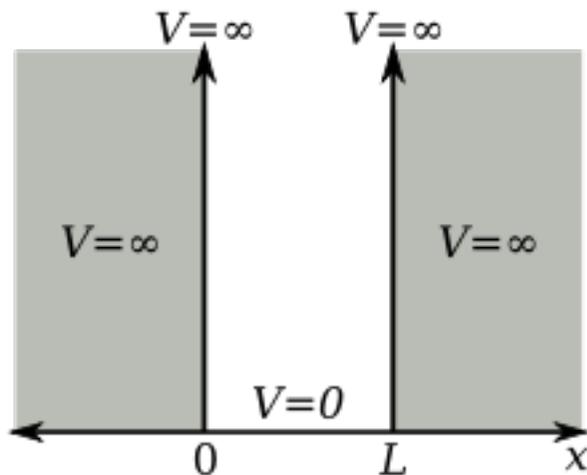
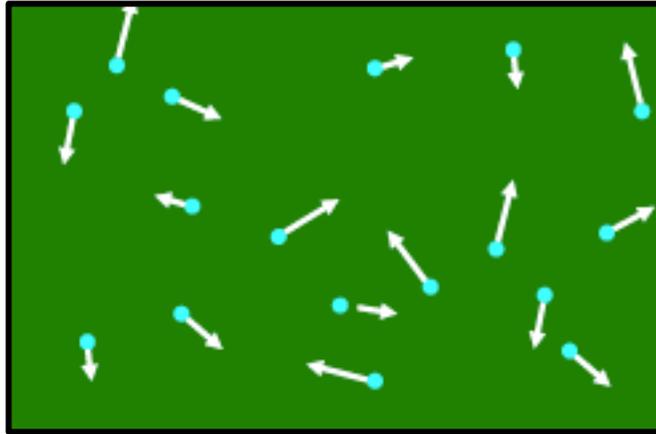


Le modèle de Fermi

ça dépend du libre parcours moyen d'un nucléon dans le noyau...



MODELE DE FERMI : LE GAZ D'ELECTRONS



Modèle du gaz d'électron libres dans le métal
importé dans la physique nucléaire

Paradoxe pour le noyau :
gaz \leftrightarrow particules (quasi indépendantes) or
l'interaction nucléaire est de **courte portée !**

Mais

Principe de Pauli (1925) :

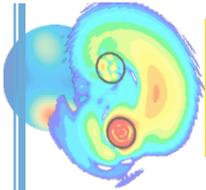
2 fermions indiscernables ne peuvent pas être
simultanément dans le **même état quantique**

Csq : les nucléons ne peuvent pas se rapprocher
les uns des autres

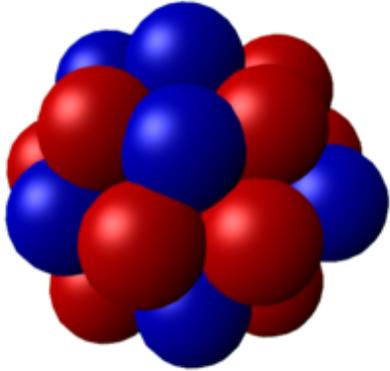
→ **Les nucléons sont comme libres dans le noyau**
libre parcours moyen \sim taille du noyau

► Solution du problème dit « à N corps » (où N est
le nombre de nucléons)

**nucléons + interaction à 2 corps = nucléon dans un
champ « moyen »**



MODELE DE FERMI : LE GAZ D'ELECTRONS

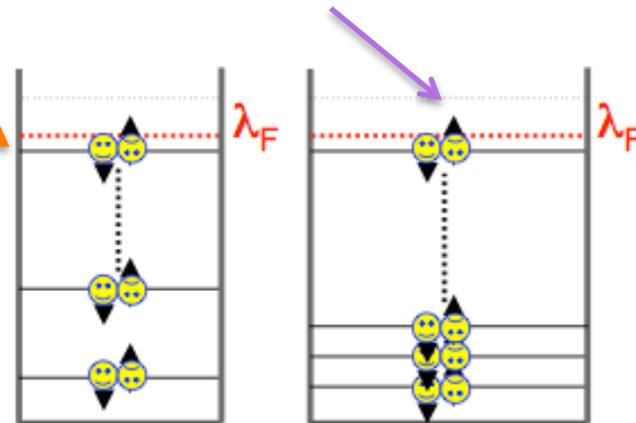
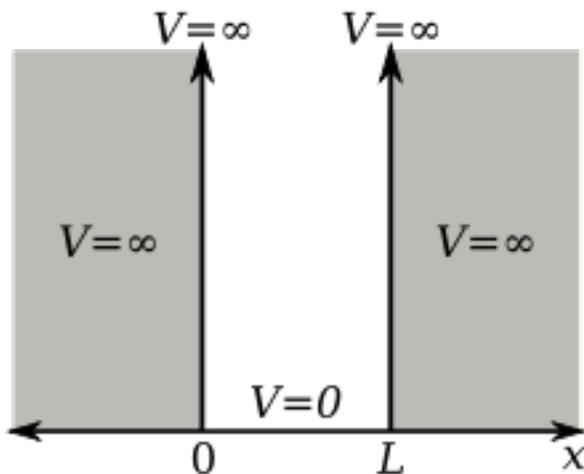


Les nucléons du noyau ne sentent que les bords du noyau
→ **boîte avec des bords infinis** (= puits carré)

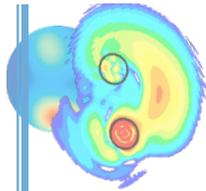
On remplit les états quantiques (en respectant le principe de Pauli)

profondeur du puits : $\varepsilon_F + 8 \text{ MeV}$ (constante)

dernier état occupé
 ε_F (dépend de la densité)

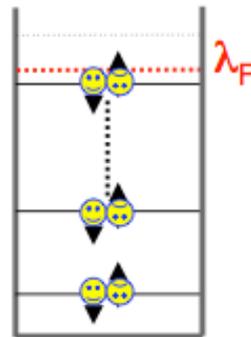


Si A augmente, le volume du noyau augmente
mais la **profondeur est constante**
→ les états quantiques se resserrent
→ changement de la forme du puits



NIVEAUX D'ENERGIE

Il s'agit d'une représentation...



≠

dont le sens n'est pas

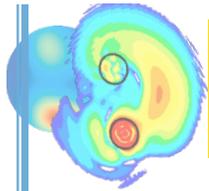


mais plutôt ...



hauteur note = fréquence onde sonore

Cantique pas Quantique :
son \Rightarrow propagation onde mécanique
(compression) dans un milieu
(d'où pas de son dans le vide)

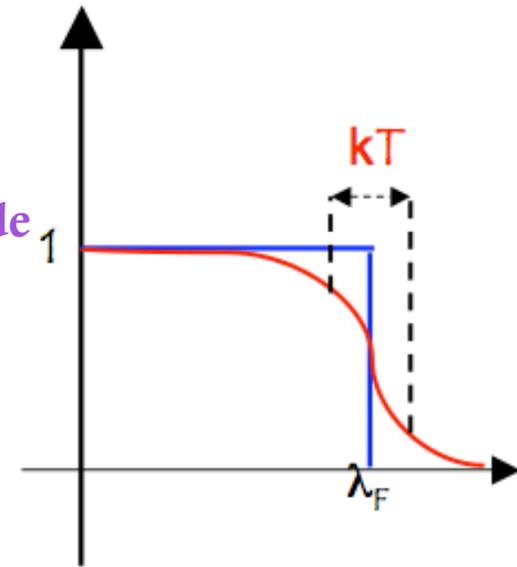


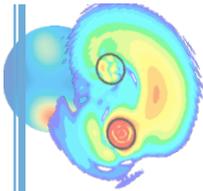
SUCCÈS ET LIMITES DU MODÈLE DE FERMI

- ▶ permet de justifier les paramètres pour la goutte liquide
- ▶ résultats en accord avec l'expérience :
 - profondeur de puits constante \rightarrow densité constante \rightarrow saturation
- ▶ insertion de la MQ

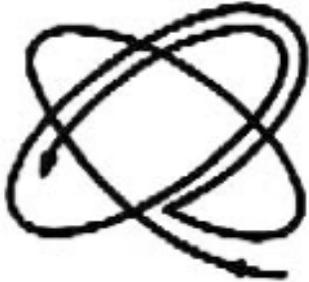
MAIS

- ▶ **Changement de la notion de température / goutte liquide**
 - gaz classique** : par collisions $T \leftrightarrow \langle v^2 \rangle$
 - noyau** : seuls les nucléons proches du niveau de Fermi peuvent être excités par augmentation de T (statistique quantique)
- ▶ **Pas d'effets de structure (appariement, sur-stabilité...)**





ORDRE OU CHAOS ? LES COUCHES ...

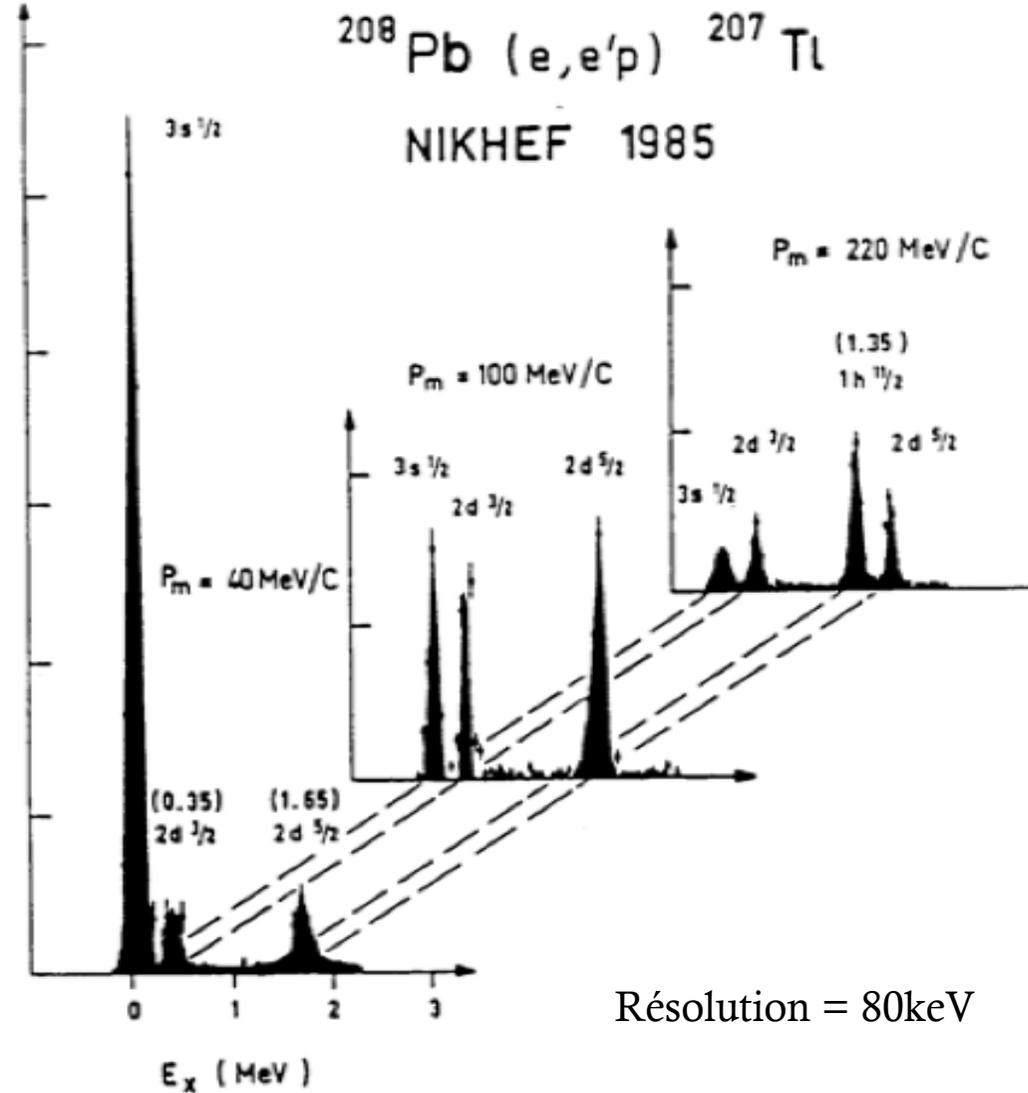


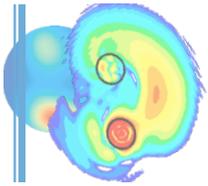
Le modèle en couches

SHELLS WITH LAYERS



Probabilité d'un proton ait l'énergie E_x



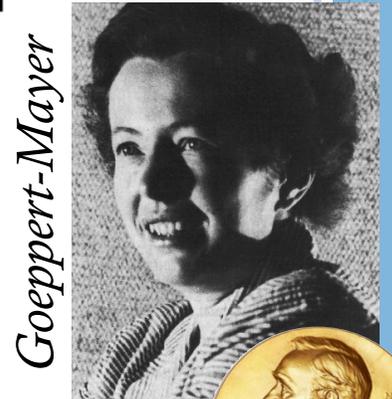
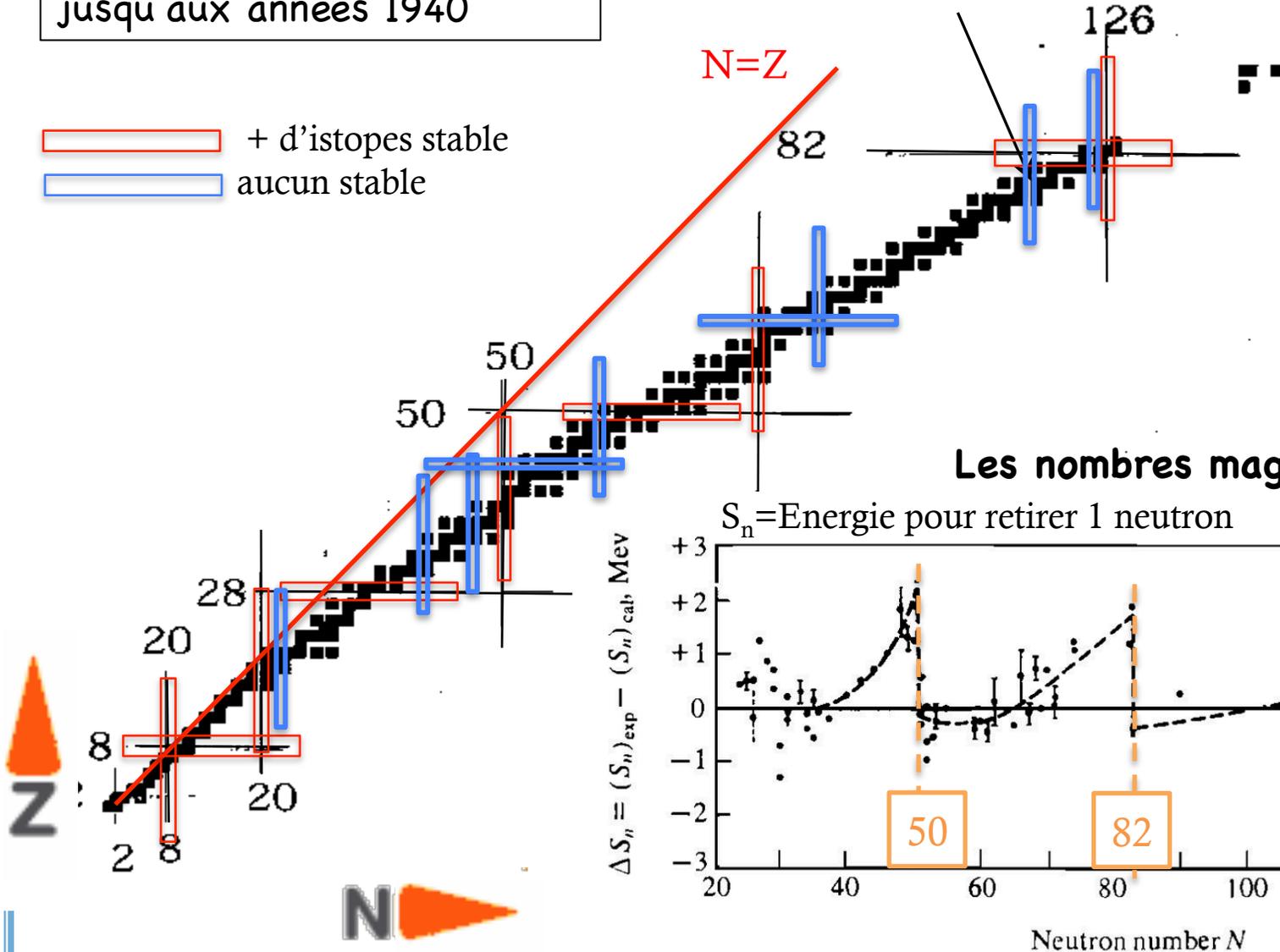


LA DÉCOUVERTE DU MODÈLE EN COUCHES

Ensemble des noyaux connus jusqu'aux années 1940

- + d'isotopes stable
- aucun stable

Noyaux stables

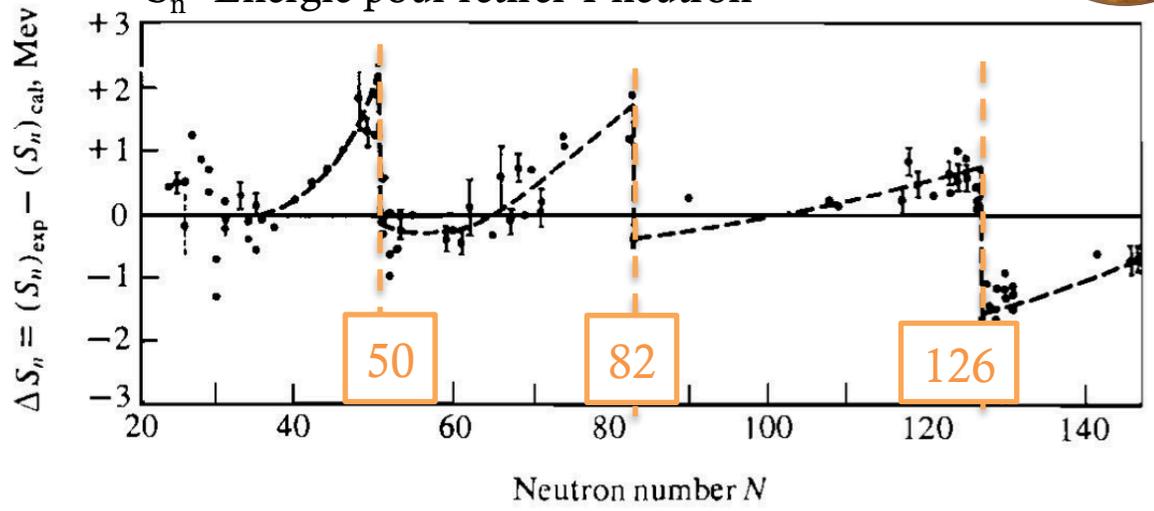


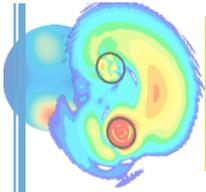
Goeppert-Mayer



Les nombres magiques

S_n = Energie pour retirer 1 neutron

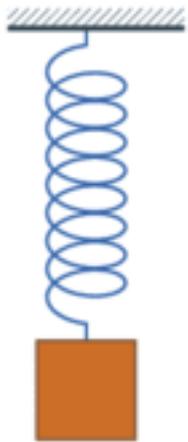




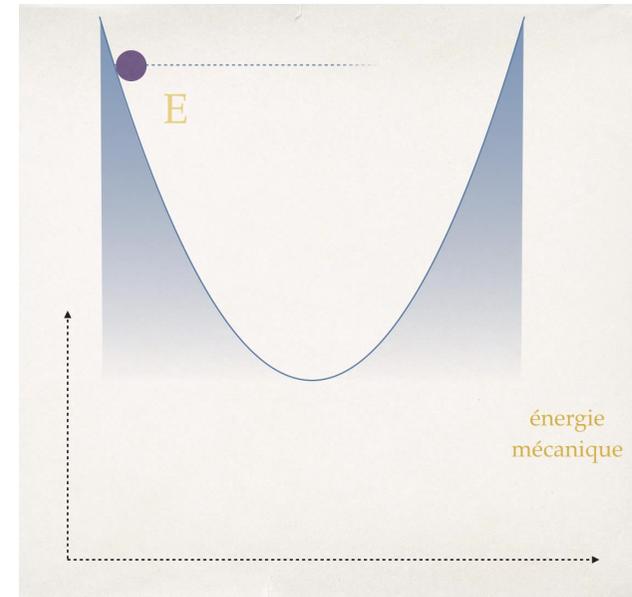
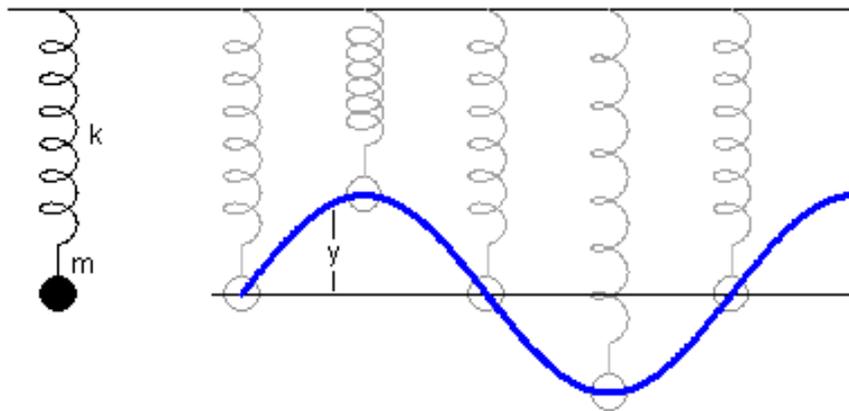
LE POTENTIEL HARMONIQUE (CLASSIQUE)

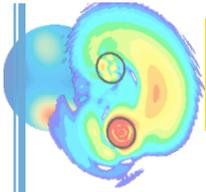
- ▶ Il faut améliorer le potentiel !
 - les bords infinis ne sont pas réalistes
 - on ne pourrait pas arracher des nucléons car le S_n serait infini !

- ▶ **Potentiel harmonique**



l'évolution décrite par une **sinusoïde** dont la **fréquence** ne dépend que des caractéristiques du système et **l'amplitude est constante**.
→ Modèle classique

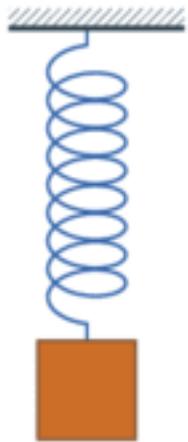




LE POTENTIEL HARMONIQUE (QUANTIQUE)

- ▶ Il faut améliorer le potentiel !
 - les bords infinis ne sont pas réalistes
 - on ne pourrait pas arracher des nucléons car le S_n serait infini !

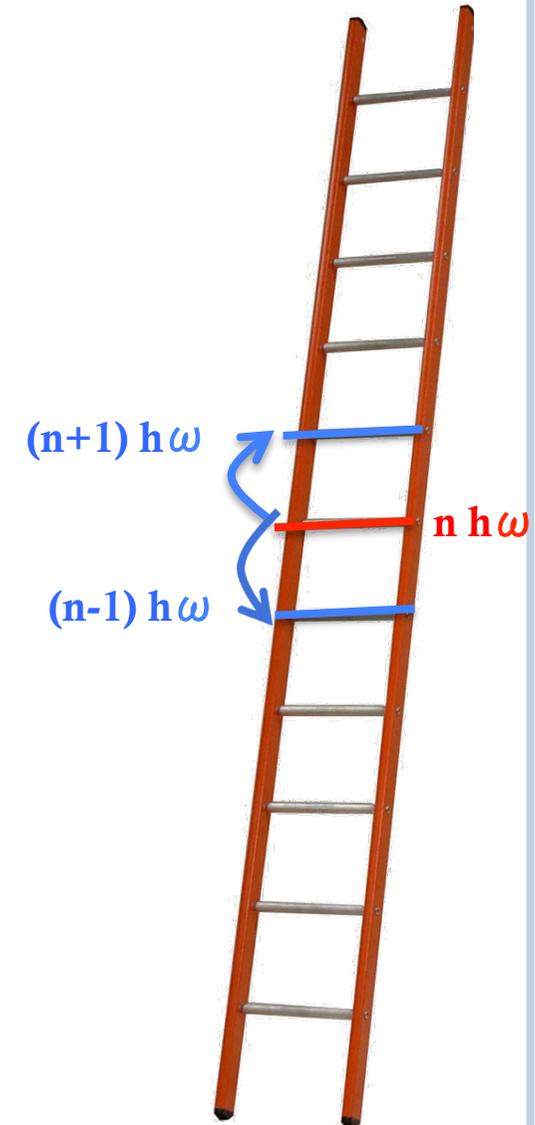
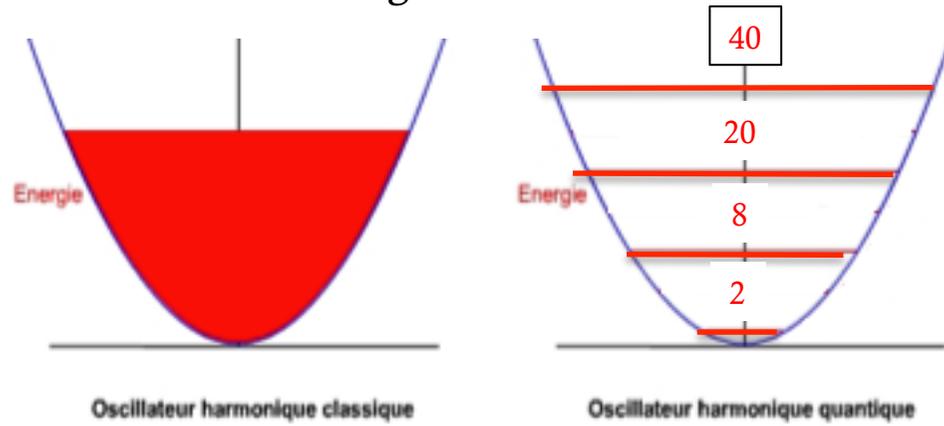
▶ Potentiel harmonique

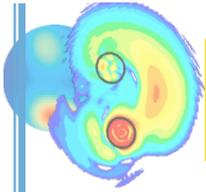


l'évolution décrite par une **sinusoïde** dont la **fréquence** ne dépend que des caractéristiques du système et l'**amplitude est constante**.

→ Modèle quantique

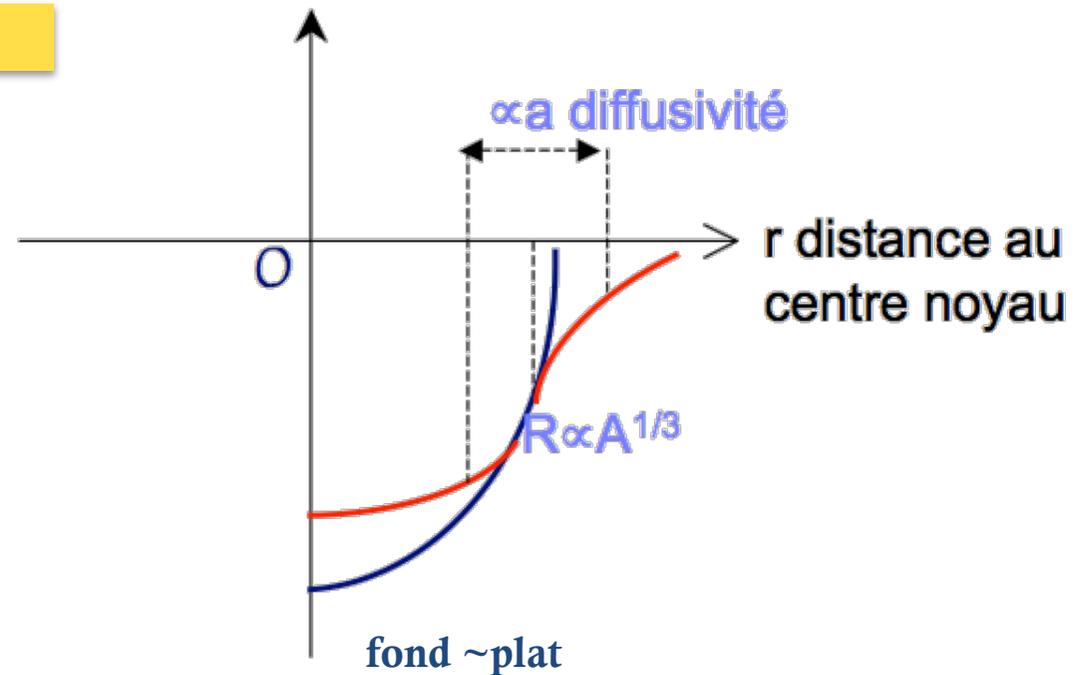
couches régulières : $E = n h \omega$

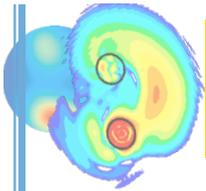




UN POTENTIEL PLUS RÉALISTE : LE WOODS-SAXON

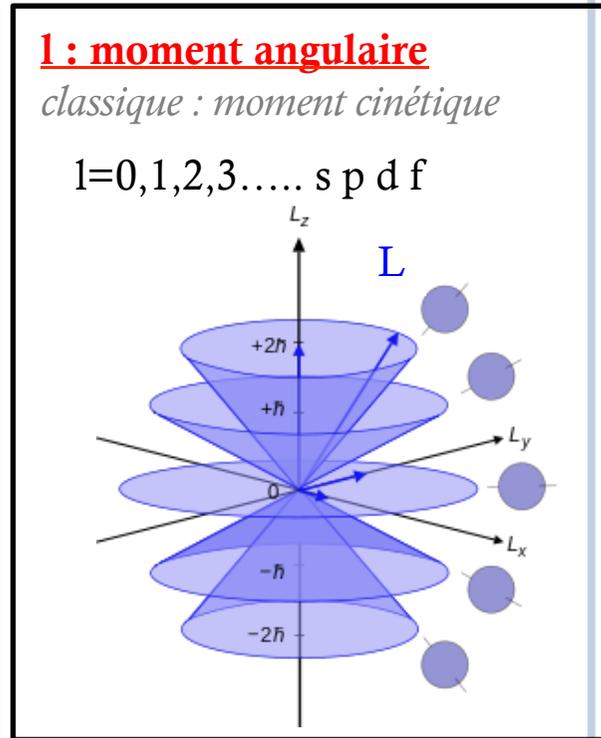
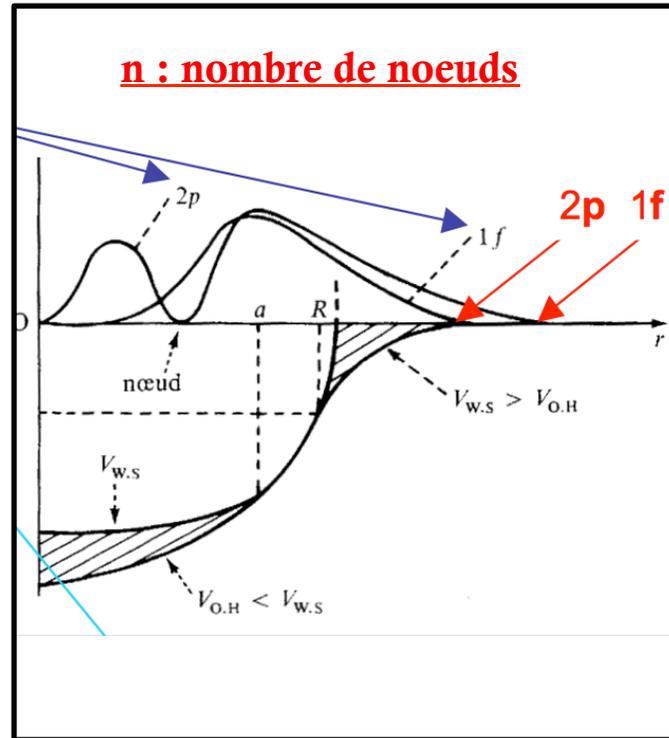
- ▶ Il faut améliorer le potentiel !
 - les bords infinis ne sont pas réalistes
 - on ne pourrait pas arracher des nucléons
 - les bords du puits ne sont pas « droits »
 - le noyau a des **bords diffus** (proche de la distribution de densité du noyau)
- ▶ Potentiel de Woods-Saxon





LES NOMBRES MAGIQUES ET LE WS

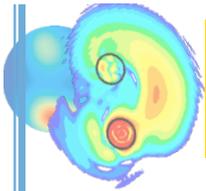
N	$n \ell$							
112								
5h ω	$\pi -$	<table border="0"> <tr><td>2p</td><td>—</td></tr> <tr><td>1f</td><td>—</td></tr> <tr><td>0h</td><td>—</td></tr> </table>	2p	—	1f	—	0h	—
2p	—							
1f	—							
0h	—							
70		68						
4h ω	$\pi +$	<table border="0"> <tr><td>2s</td><td>—</td></tr> <tr><td>1d</td><td>—</td></tr> <tr><td>0g</td><td>—</td></tr> </table>	2s	—	1d	—	0g	—
2s	—							
1d	—							
0g	—							
40		40						
3h ω	$\pi -$	<table border="0"> <tr><td>1p</td><td>—</td></tr> <tr><td>0f</td><td>—</td></tr> </table>	1p	—	0f	—		
1p	—							
0f	—							
20		20						
2h ω	$\pi +$	<table border="0"> <tr><td>1s</td><td>—</td></tr> <tr><td>0d</td><td>—</td></tr> </table>	1s	—	0d	—		
1s	—							
0d	—							
8		8						
1h ω	$\pi -$	0p						
2		2						
0h ω	$\pi +$	0s						



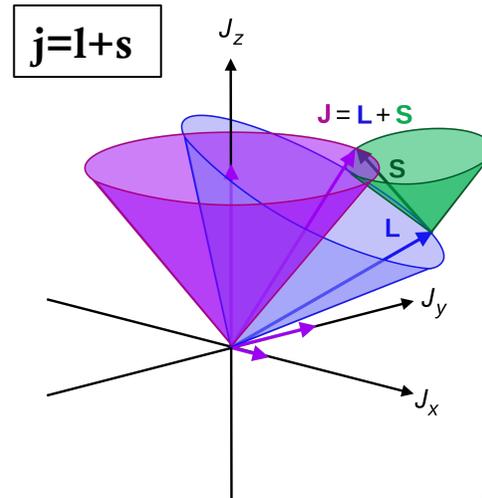
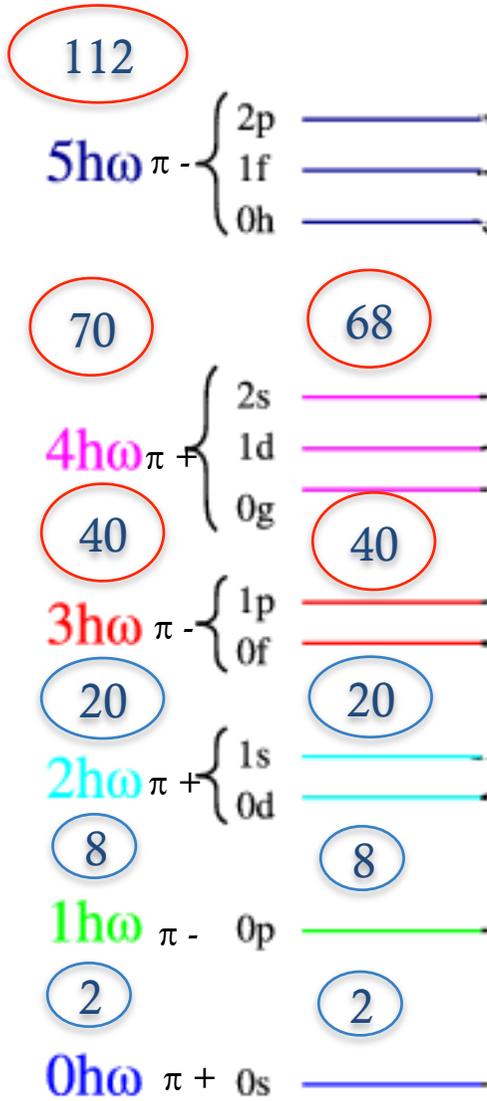
Parité :

$r \rightarrow -r$

+ si f.o. $(-r)=f.o.(r)$

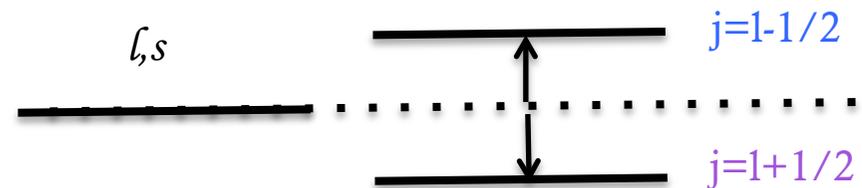
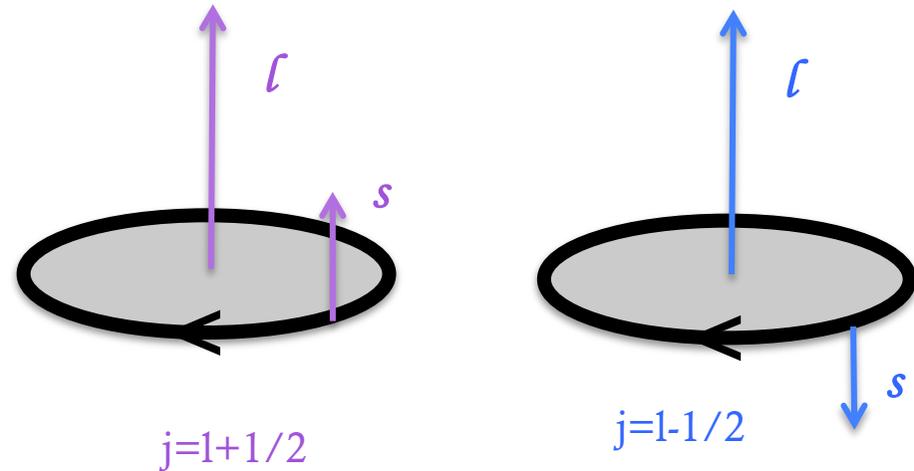


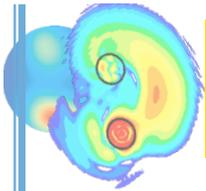
IL MANQUE QUELQUE CHOSE : LE SPIN-ORBITE



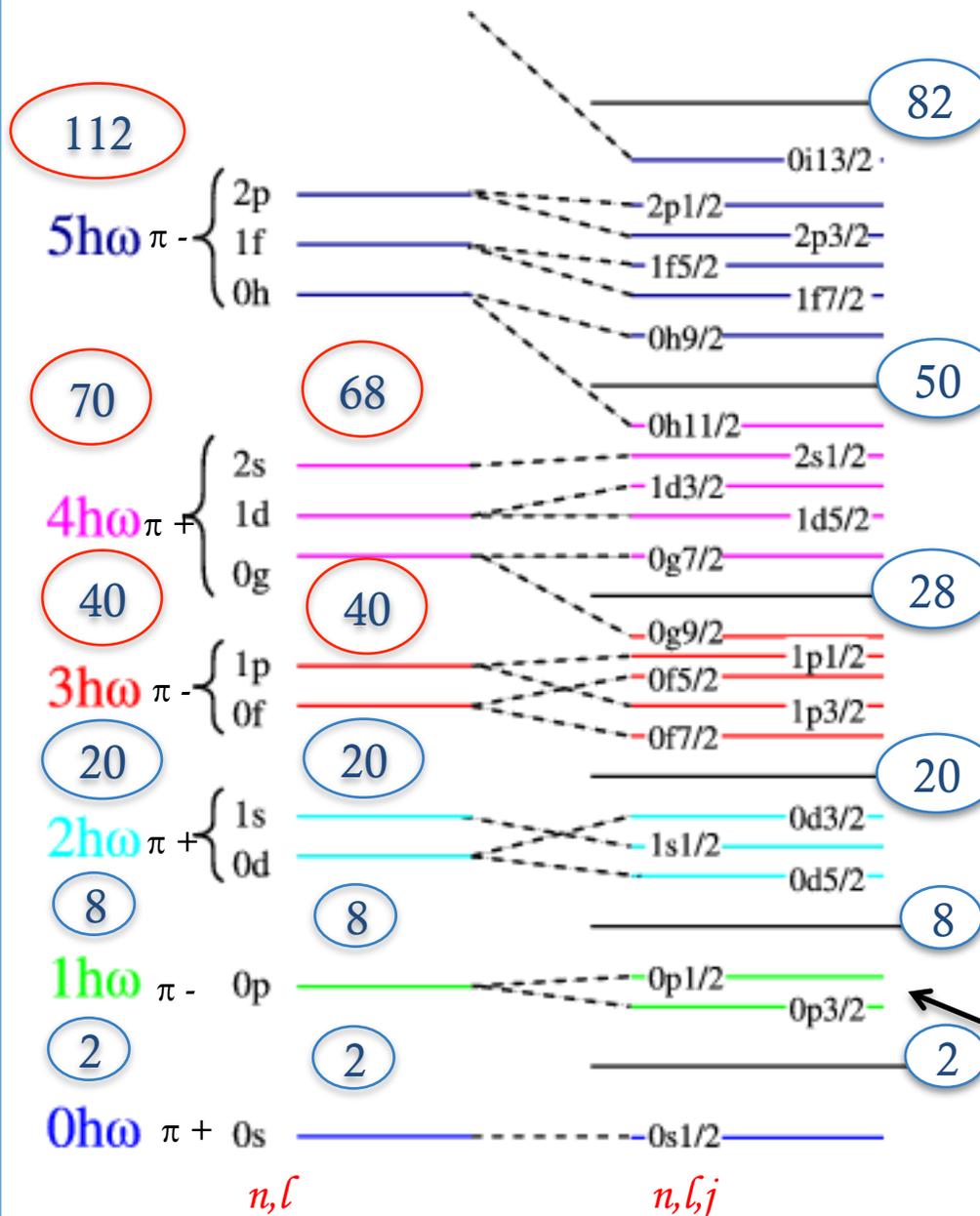
• **Spin-orbite** = interaction du spin avec le mouvement

→ importé de la physique atomique : interaction électromagn. du moment magnétique de l'électron avec le champ magnétique généré par son mouvement autour du noyau





IL MANQUE QUELQUE CHOSE : LE SPIN-ORBITE



- **Spin-orbite** = interaction du spin avec le mouvement

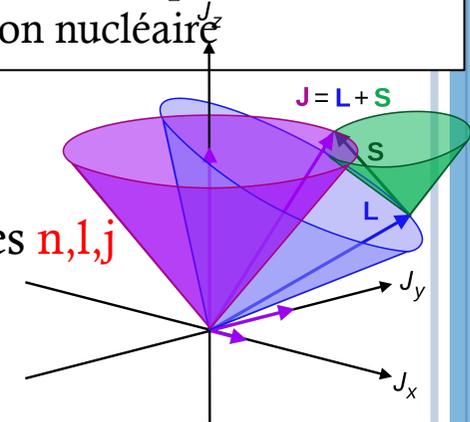
→ importé de la physique atomique : interaction électromagn. du moment magnétique de l'électron avec le champ magnétique généré par son mouvement autour du noyau

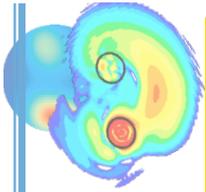
- Maria Goppert-Mayer → en physique nucléaire (prix nobel 1948)

- ▶ spin orbite **beaucoup plus importante** en nucléaire (x 20 !) du même ordre que champ moyen

- ▶ origine différente : provient de l'interaction nucléaire

Sous-couches n, l, j avec $j=l+s$

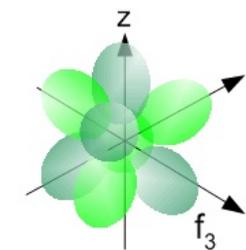
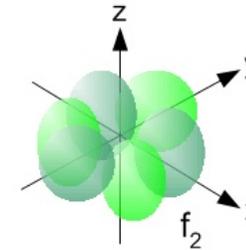
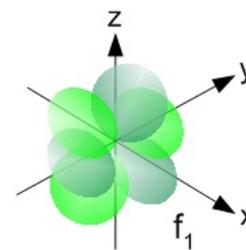
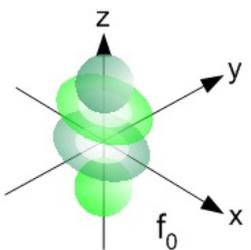
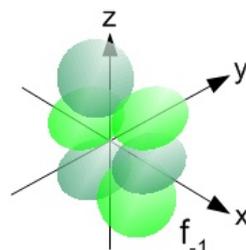
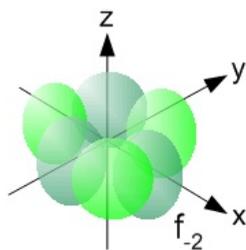
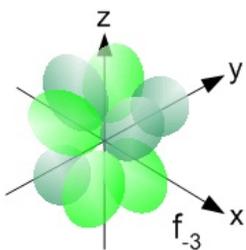
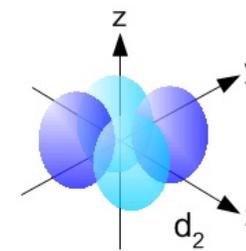
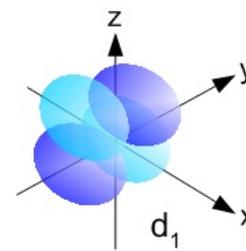
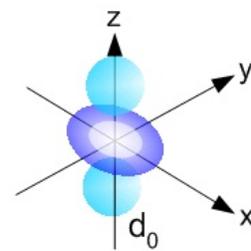
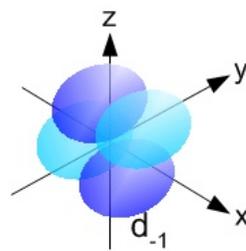
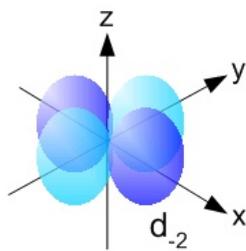
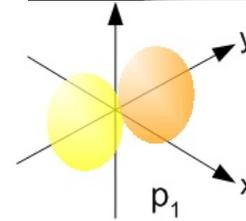
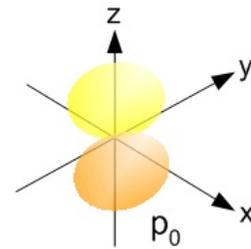
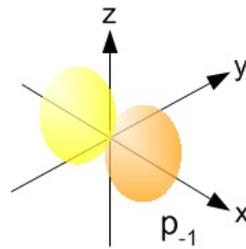
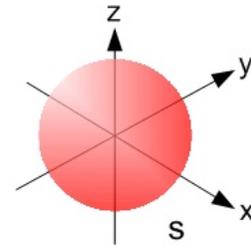


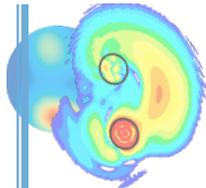


QUELQUES EXEMPLES D'ORBITALES, POUR SE DÉTENDRE

n = nombre de nœuds radiaux

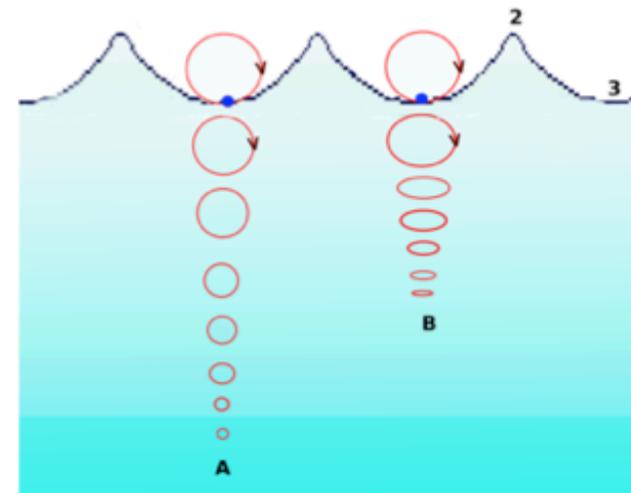
l = nombre de nœuds angulaires (nombre de plans de symétrie)





LES VAGUES DE LA MER ET LES GOUTTES D'EAU...

« Et pour juger encore mieux des petites perceptions que nous ne saurions distinguer dans la foule, j'ai coutume de me servir de l'exemple du mugissement ou du bruit de la mer dont on est frappé quand on est au rivage. Pour entendre ce bruit comme l'on fait, **il faut bien qu'on entende les parties qui composent ce tout, c'est-à-dire les bruits de chaque vague, quoique chacun de ces petits bruits ne se fasse connaître que dans l'assemblage confus de tous les autres ensemble, c'est-à-dire dans ce mugissement même, et ne se remarquerait pas si cette vague qui le fait était seule.** » Leibniz



Classique:

somme déplacements verticaux gouttes d'eau
⇒ 1 onde mécanique (vague: mvt horizontal)

Quantique:

Σ mvts nucléons dans états individuels dans noyau
⇒ 1 onde \equiv 1 noyau dans 1 état quantique (global)
⇒ Autant de configurations autant d'états...

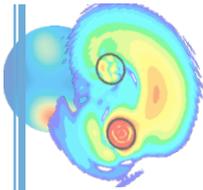
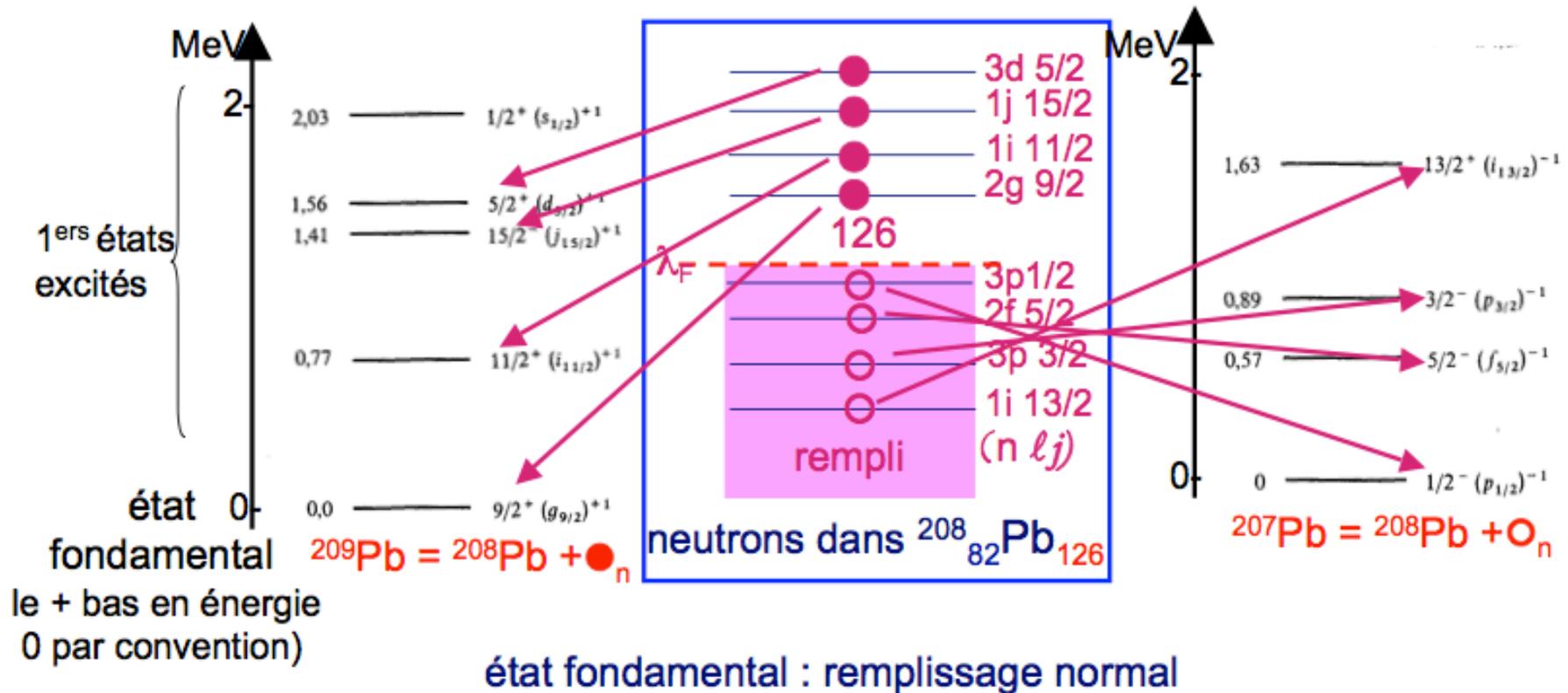


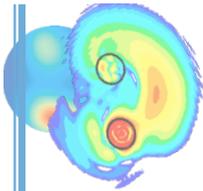
SCHÉMA DES NOYAUX IMPAIRS

Autour du doublement magique $^{208}_{82}\text{Pb}_{126}$: un très bon cœur

excitation \leftrightarrow
 \uparrow nucléon célibataire
 $j_{\text{nucléon}} = J \text{ noyau}$

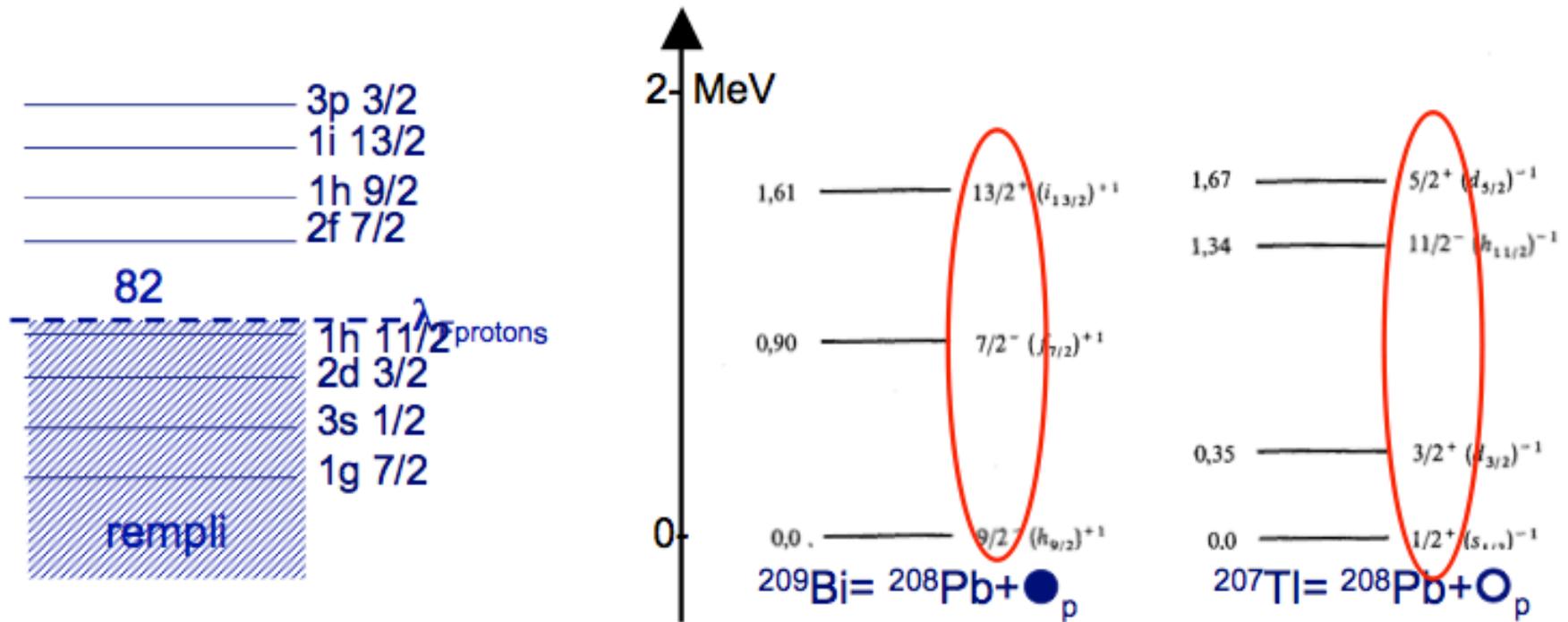
gap empêche d'aller
 dans les états au-dessus
 trop cher en énergie



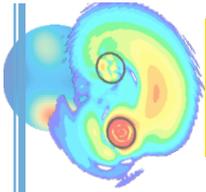


CA MARCHE DÉJÀ MOINS BIEN EN PROTONS !

Autour du doublement magique $^{208}_{82}\text{Pb}_{126}$: en protons

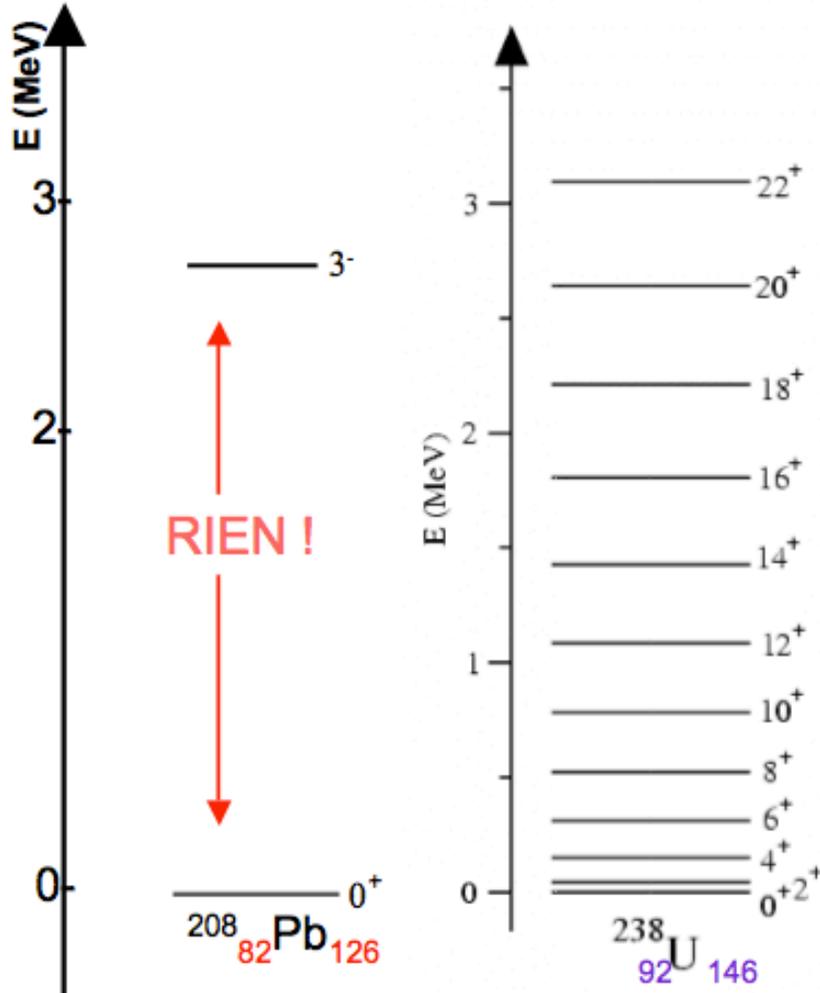


pas le bon ordre !!!!!



LES NOYAUX MAGIQUES : DES BONS CŒURS INERTES

1 excitation dans les nucléons \Rightarrow 1 état excité du noyau



doublt magique pas magique

bcp d'énergie pour ébranler l'édifice \Leftrightarrow stabilité

Règle: Fondamental Noyau pair-pair (p-p) est toujours 1 état $J_{\text{noyau}} = 0$

Corollaire: Fond. Noyau pair-impair (p-i) déterminé par le nucléon célibataire :

$$J_{\text{noyau p-i}} = 0 + j_{\text{célibataire}}$$

Mais:

Noyau_{p-p} = Noyau_{p-i} + nucléon

$$= (\text{Noyau}_{\text{p-p}} + \text{nucléon}) + \text{nucléon}$$

$$\Rightarrow J_{\text{Noyau p-p}} = 0 + j_{\text{célibataire}} + j'_{\text{célibataire}} = 0$$

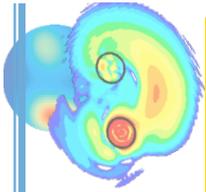
$$\text{si } j_{\text{célibataire}} + j'_{\text{célibataire}} = 0$$

\Rightarrow les nucléons se lient en paires \downarrow

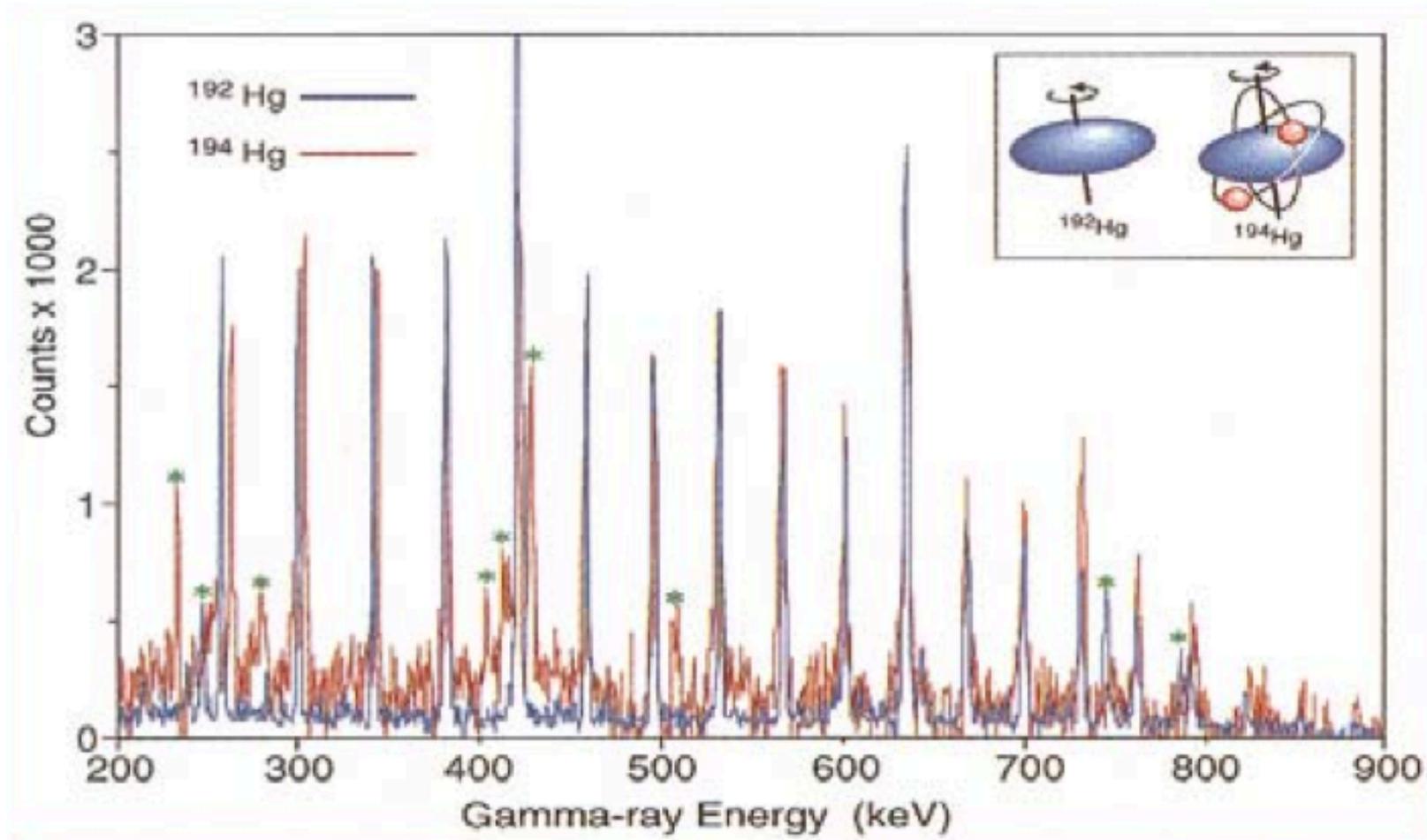
\Leftrightarrow APPARIEMENT (gain de liaison)

Conséquence : 1^{ères} excitations Noyau pair-pair peuvent ne pas être de type individuel (nucléon).

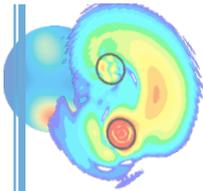
Ex: ²³⁸U schéma de niveaux régulier ni individuel ni osc. harm. (vibration)



LES LIMITES DU MODÈLE EN COUCHE : (I) LES DÉCROISSANCES GAMMA IDENTIQUES

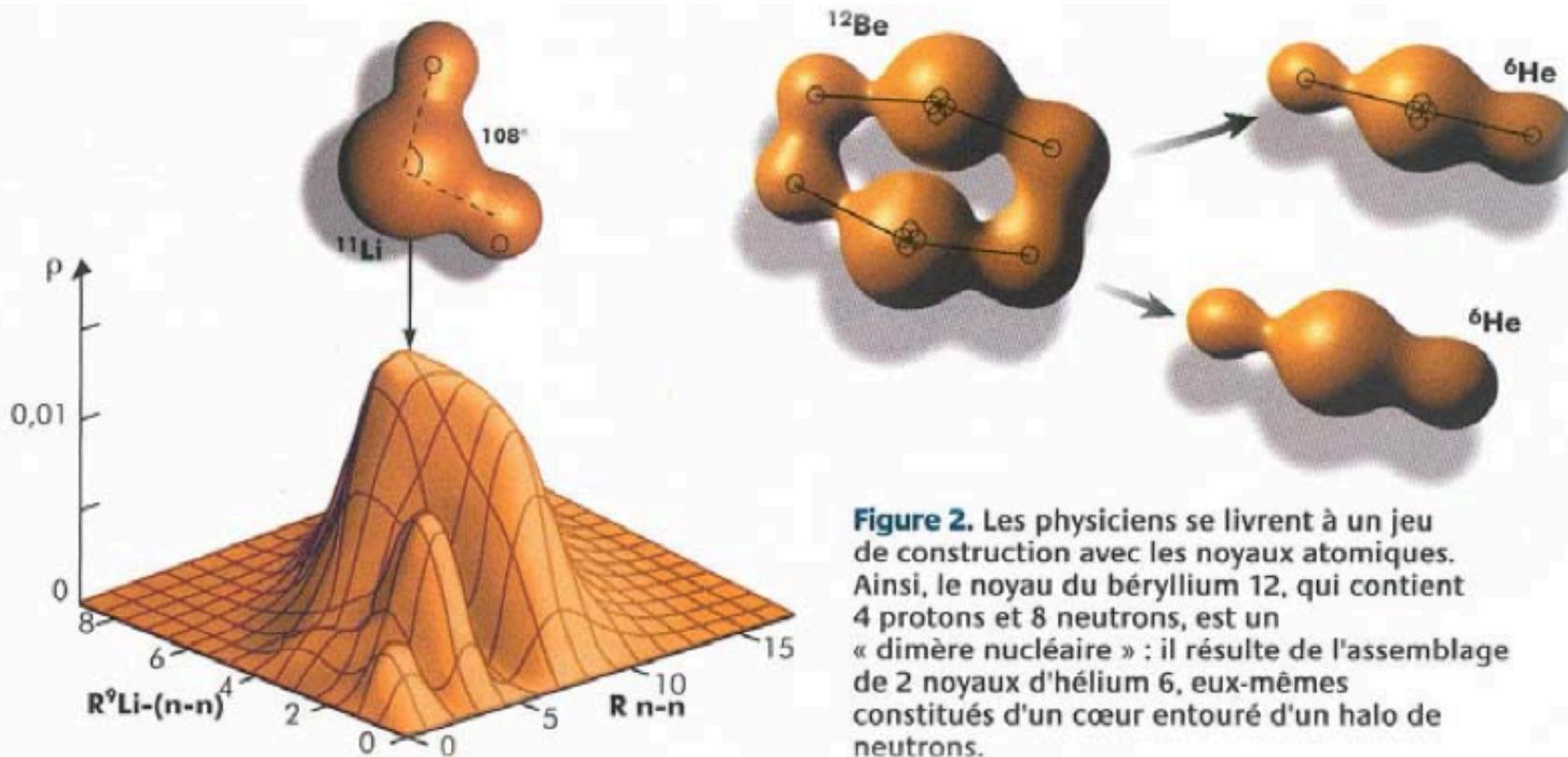


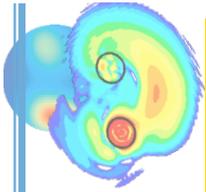
La signature gamma des noyaux n'est pas unique !!



LES LIMITES DU MODÈLE EN COUCHES : (II) DES « CLUSTERS »* DANS LES NOYAUX

* « cluster » = agrégats





LE MODÈLE EN COUCHE = NOTRE MODÈLE STANDARD ?

Les plus :



- ▶ On peut introduire de nouveaux effets dans le modèle :
 - interaction à 3 corps
- ▶ variations de l'interaction avec l'isospin

donc le modèle en couche reste notre base mais...

Il y a d'autres approches (prometteuses) :

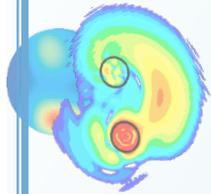
- ▶ Le traitement direct du problème à N corps en interaction
- ▶ théories dépendantes du temps qui permettent d'avoir une vision unifiée de la structure et des réactions
- ▶ ... ?

**Problème
à N corps**

**Modèle en
couches**

**Théories
dépendantes
du temps**





RÉSUMÉ DE LA DESCRIPTION DU NOYAU

- ▶ **Approche macroscopique : la goutte liquide**
 - décrit la masse, les énergies de liaison (manquent les effets de structure)
 - décrit la fission
- ▶ **Approche microscopique : le modèle en couches**
 - particules indépendantes dans un champ moyen
 - nombres magiques
 - spin parité des niveaux excités

ET POURTANT CA NE MARCHE PAS TOUJOURS !!!
variété des approches & des modèles