

# 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 ?

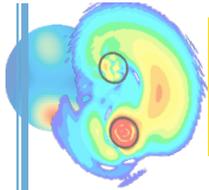
- I. Les échelles de la physique nucléaire et comment voir le noyau ?
- II. La « glue » du noyau et ses conséquences
- III. Ca pèse combien un noyau ? Masse et énergie de liaison
- IV. Les noyaux instables. Combien y en a ? Comment on les fabrique ?

## 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

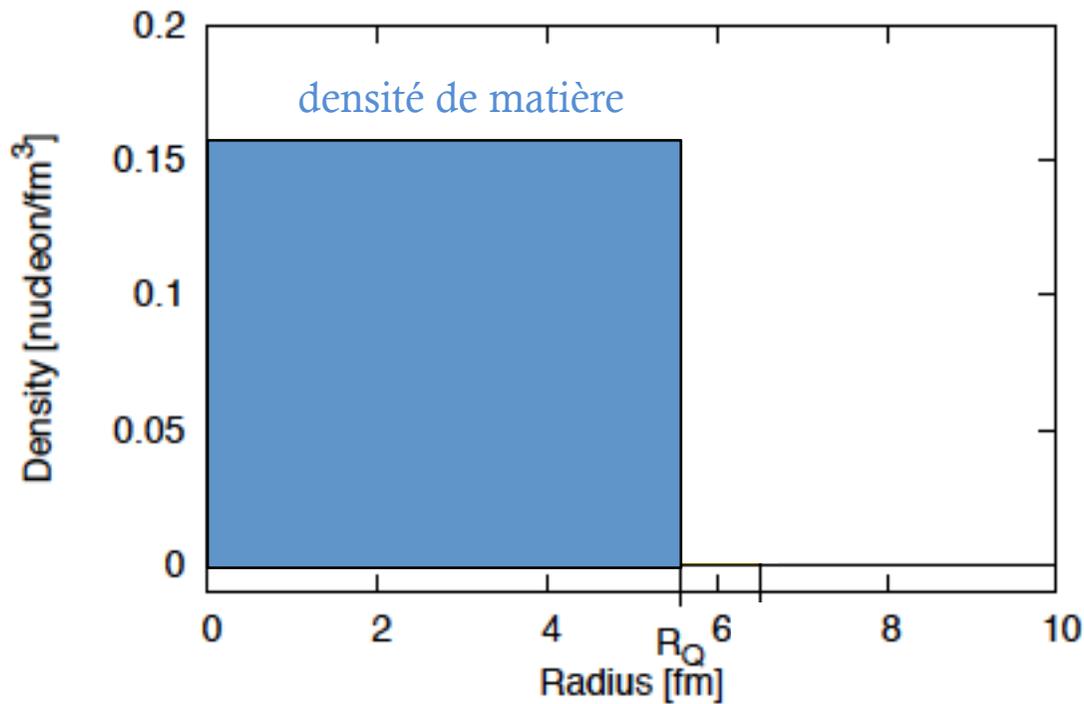


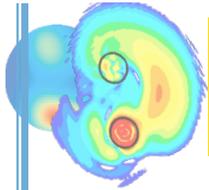
# LA DENSITÉ DES NOYAUX

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  $\text{mm}^3$  !**

## ► Cas de la sphère dure :



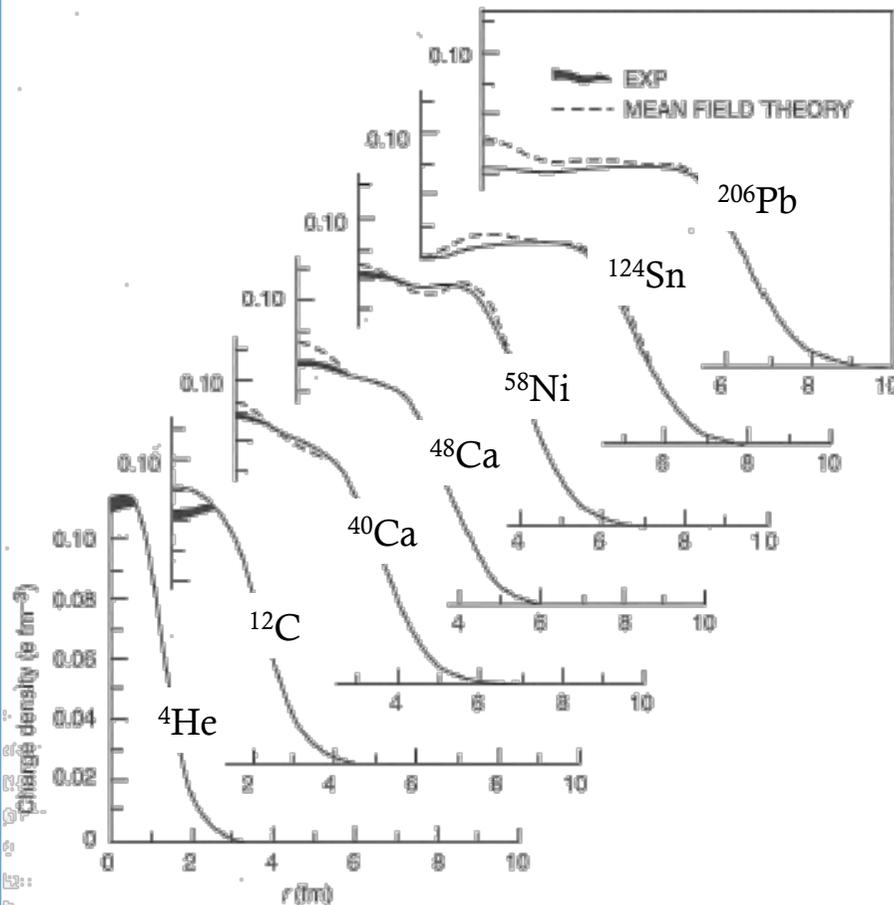


# LA DENSITÉ DES NOYAUX (STABLES)

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

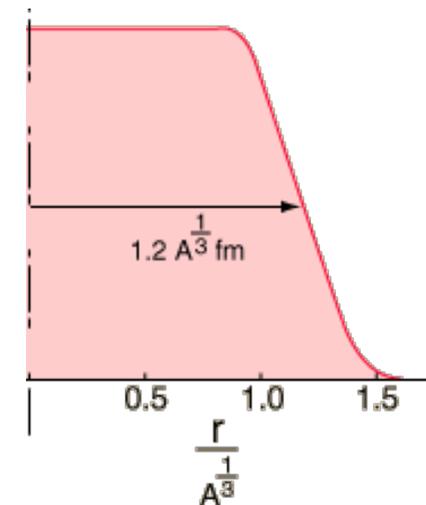
La densité de la matière du noyau est  
 de **230 000 tonnes par  $\text{mm}^3$  !**

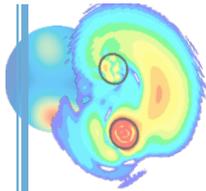
► Mesures expérimentales par diffusion d'électrons : noyau bords diffus



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

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

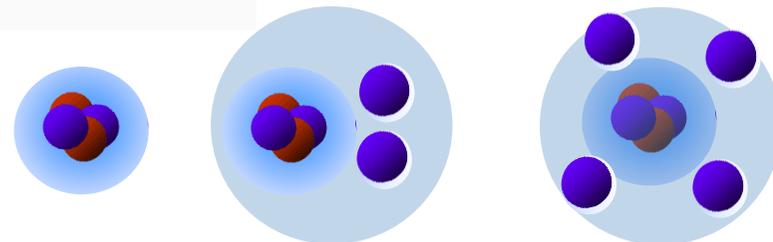
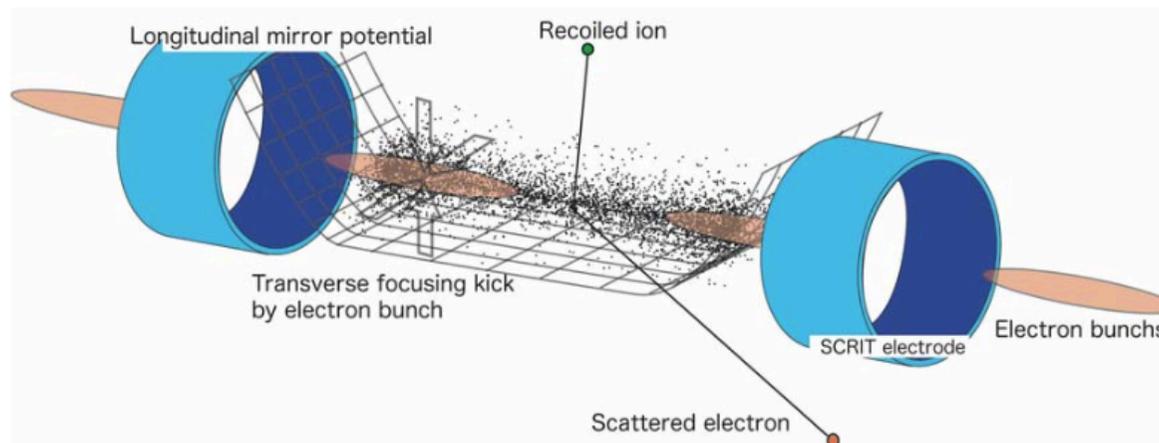
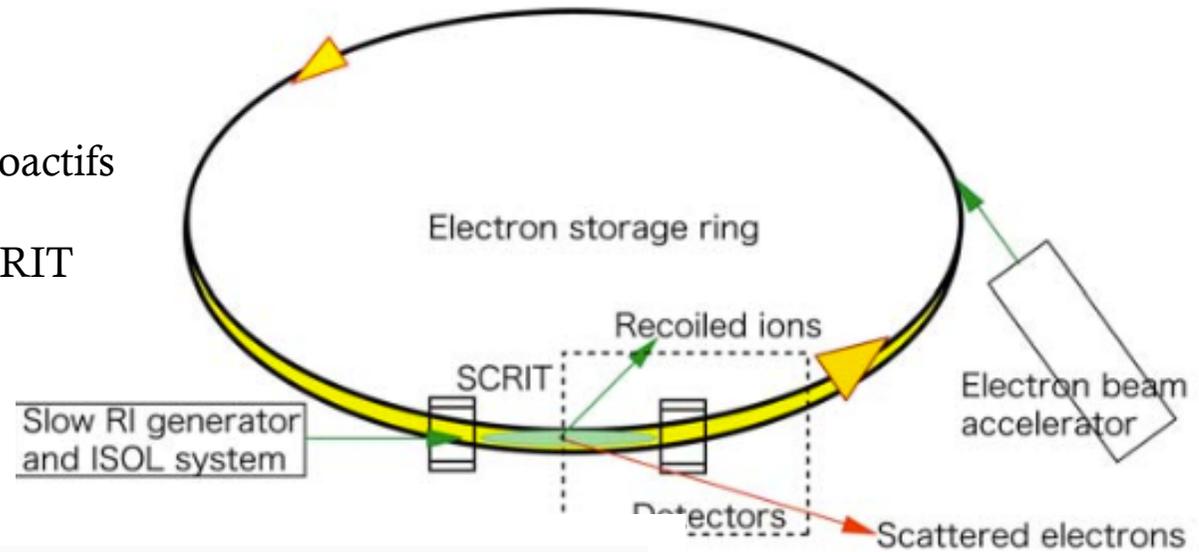


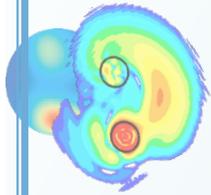


# ET POUR LES NOYAUX INSTABLES ?

On ne peut pas utiliser  
de cible pour les noyaux radioactifs

--> Nouvelle technique : SCRIT



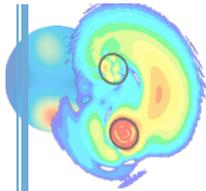


## COMMENT MODÉLISER LE NOYAU ? (I)

► **L'approche macroscopique**

Le noyau = une goutte d'eau ?

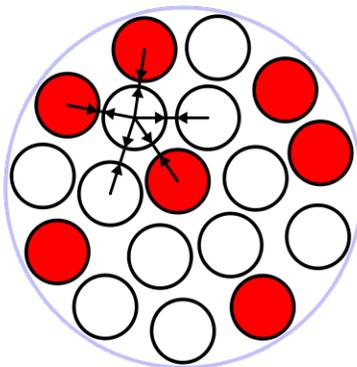




# COMMENT MODÉLISER LE NOYAU ?

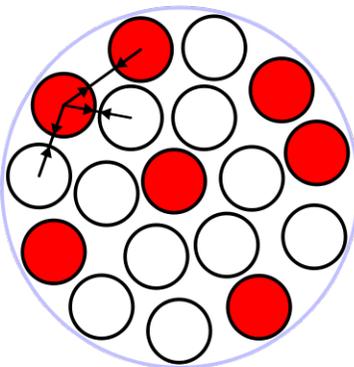
## UNE PREMIÈRE APPROCHE (MACROSCOPIQUE) : LA GOUTTE LIQUIDE

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



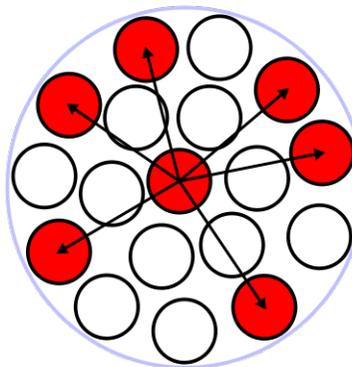
Volume

*pas de compression  
des nucléons*



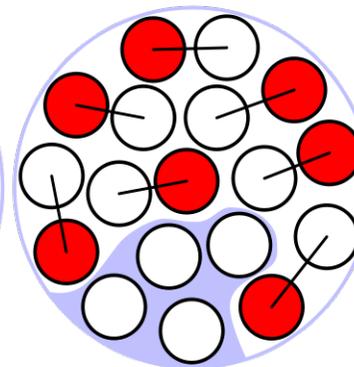
Surface

*nucléons à la  
surface ont moins  
de liaisons*



Coulomb

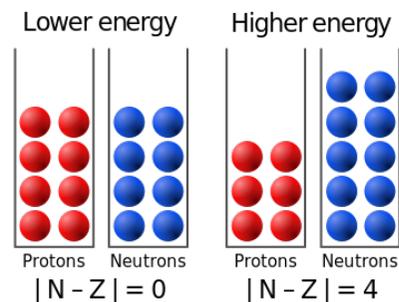
*répulsion  
coulombienne*



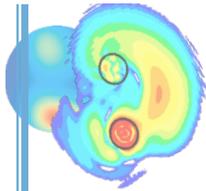
Asymmetry

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

$$A = 16$$



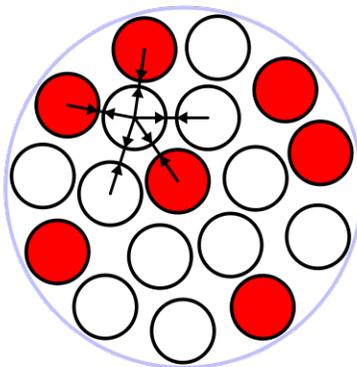
*fission !*



# COMMENT MODÉLISER LE NOYAU ?

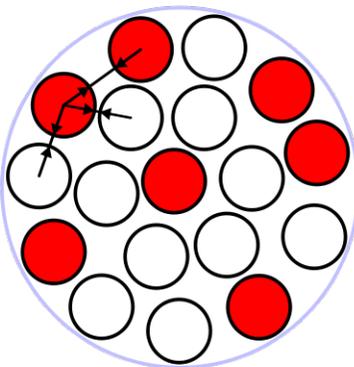
## UNE PREMIÈRE APPROCHE (MACROSCOPIQUE) : LA GOUTTE LIQUIDE

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



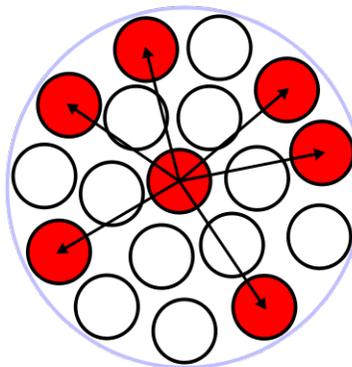
Volume

*pas de compression  
des nucléons*



Surface

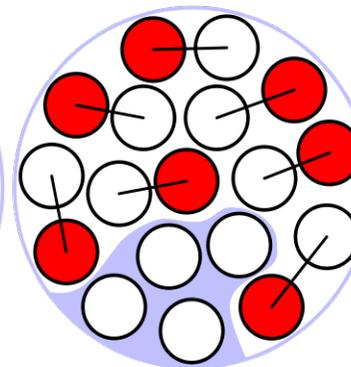
*nucléons à la  
surface ont moins  
de liaisons*



Coulomb

*répulsion  
coulombienne*

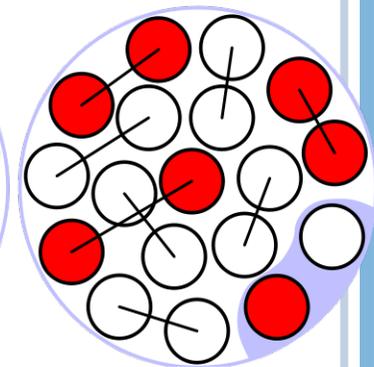
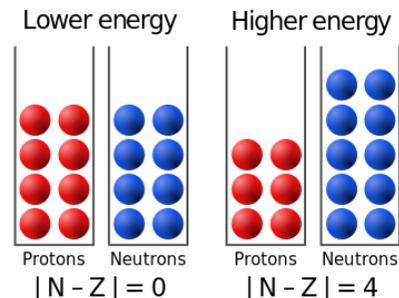
*fission !*



Asymmetry

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

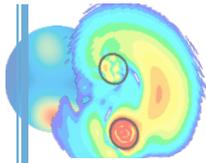
$$A = 16$$



Appariement

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





## SUCCÈS & LIMITES ...

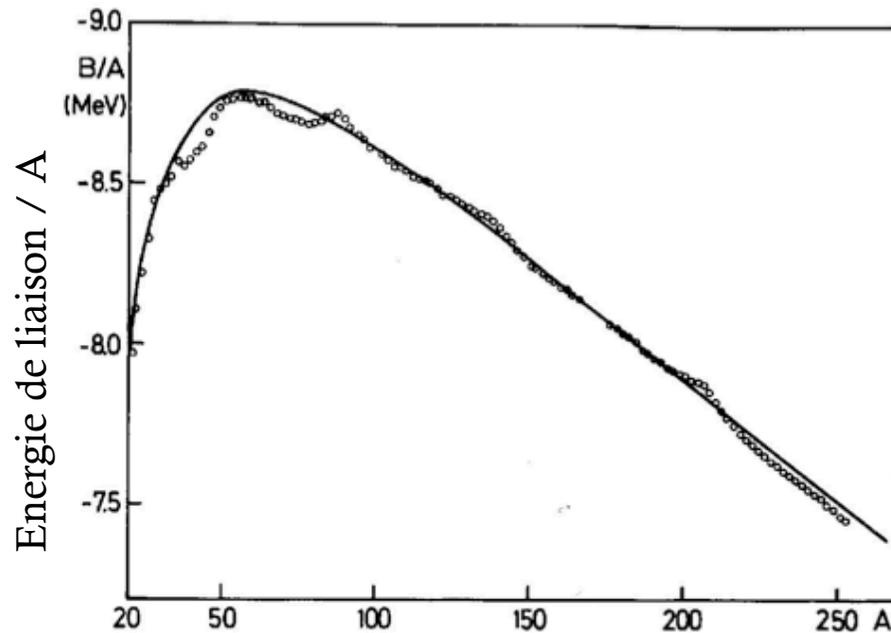
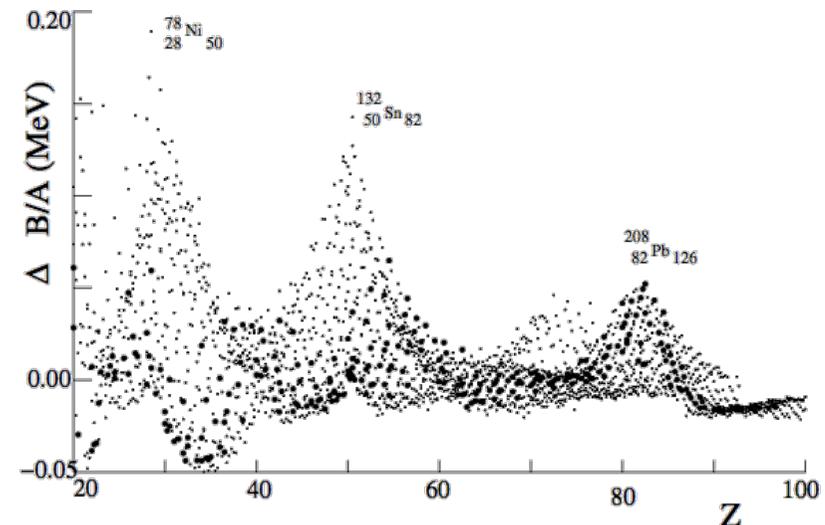


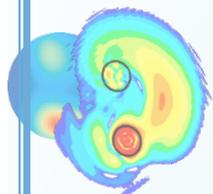
Figure 1.2. Experimental values of  $B/A$  for  $\beta$ -stable odd- $A$  ( $\circ$ ) nuclei and the calculated curve using a mass formula similar to Eq. (1.4). (From [Ho 75].)

- valeurs expérimentales
- courbe calculée avec formule goutte liquide

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

→ Effets non macroscopiques !!!

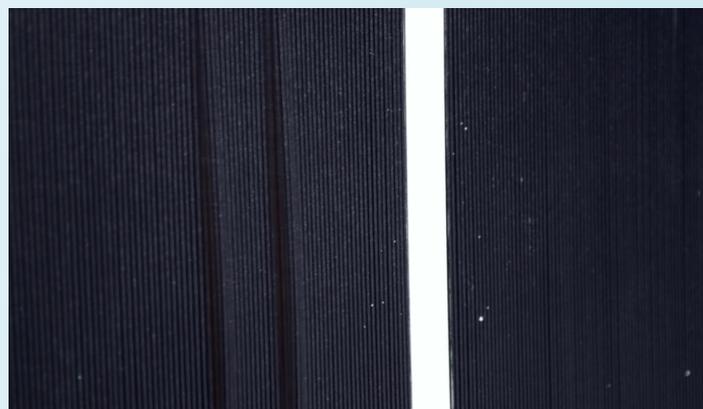
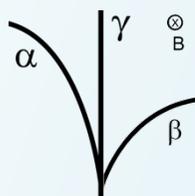


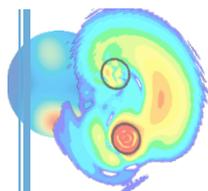


## ET LES NOYAUX INSTABLES ?



- ▶ Comment on les fabrique ?
- ▶ Aux limites de la force forte... (la carte des noyaux)





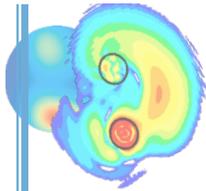
# LES RADIONUCLÉIDES NATURELS

- **Famille de l'Uranium** ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ), du **Thorium** ( $^{232}\text{Th}$ )
  - 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)
$^{40}\text{K}$	0.0117	$\beta^-$	$1.26 \times 10^9$
$^{87}\text{Rb}$	27.83	$\beta^-$	$4.88 \times 10^{10}$
$^{123}\text{Te}$	0.905	EC	$1.3 \times 10^{13}$
$^{144}\text{Nd}$	23.80	$\alpha$	$2.1 \times 10^{15}$
$^{174}\text{Hf}$	0.162	$\alpha$	$2 \times 10^{15}$

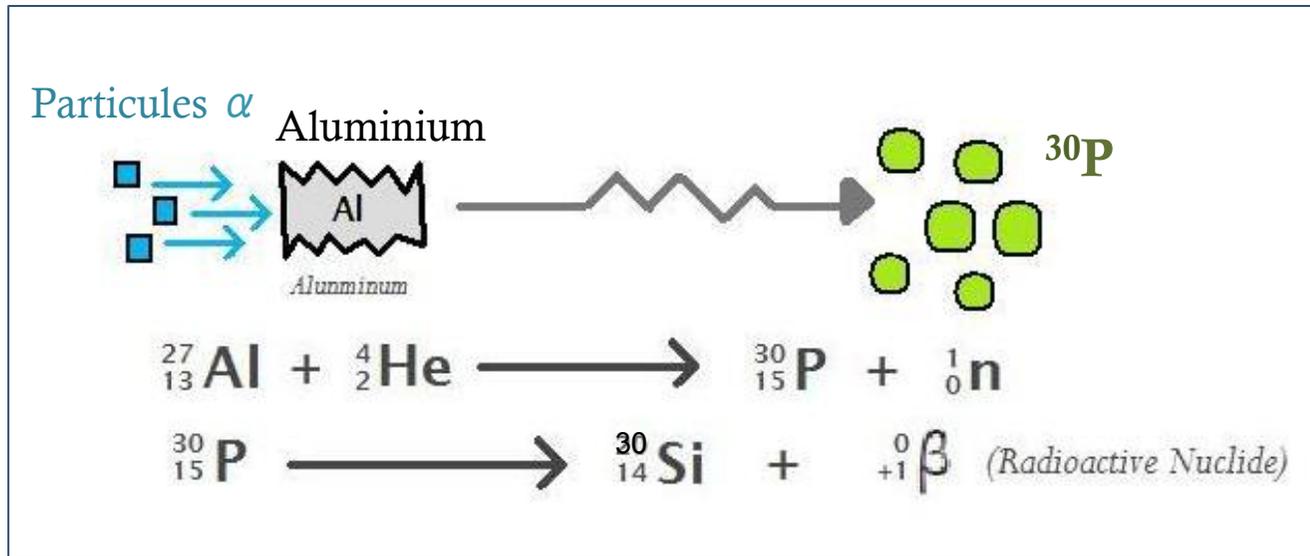
- **Les radionucléides créés par les rayons cosmiques**

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



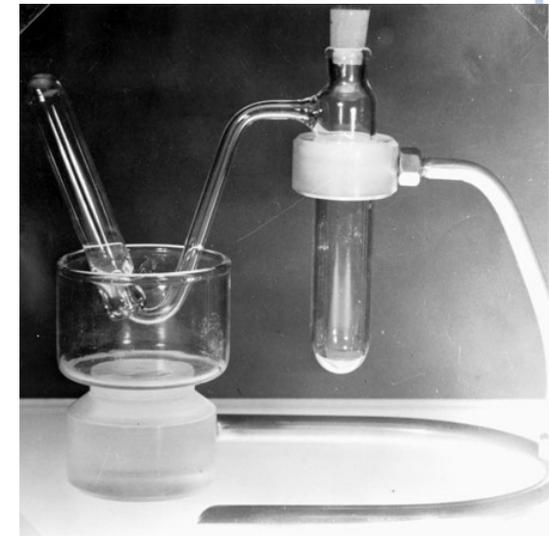
# LA FABRICATION DU PREMIER RADIONUCLÉIDE ARTIFICIEL

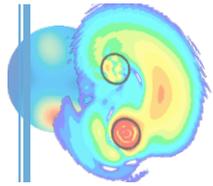
## Expérience de Frédéric et Irène Joliot-Curie (1934)



« 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



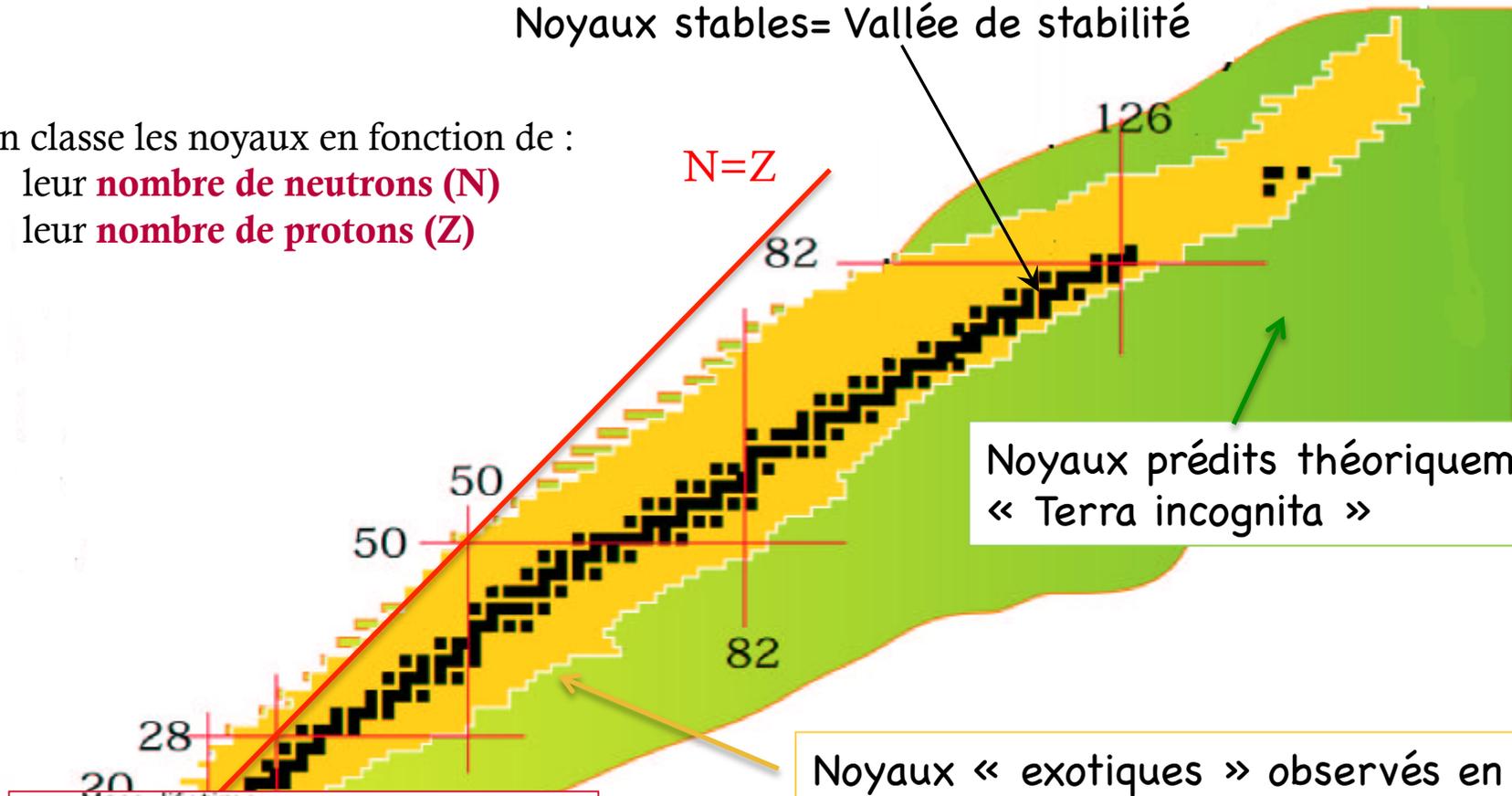


# NOTRE TERRAIN DE JEU : LA CARTE DES NOYAUX (COMPLÈTE !)

Noyaux stables = Vallée de stabilité

On classe les noyaux en fonction de :

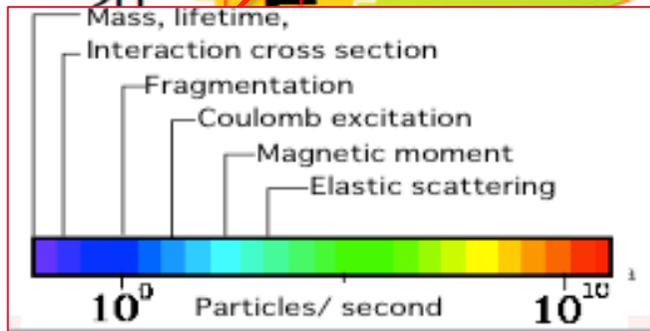
- leur **nombre de neutrons (N)**
- leur **nombre de protons (Z)**



Noyaux prédits théoriquement « Terra incognita »

Noyaux « exotiques » observés en 2017

Z

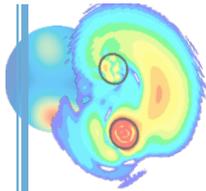


Observé ne veut pas dire étudié !

. connaître sa masse, sa taille, sa forme

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

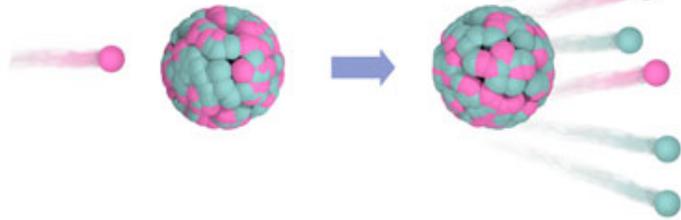
→ il faut les produire en grande quantité !



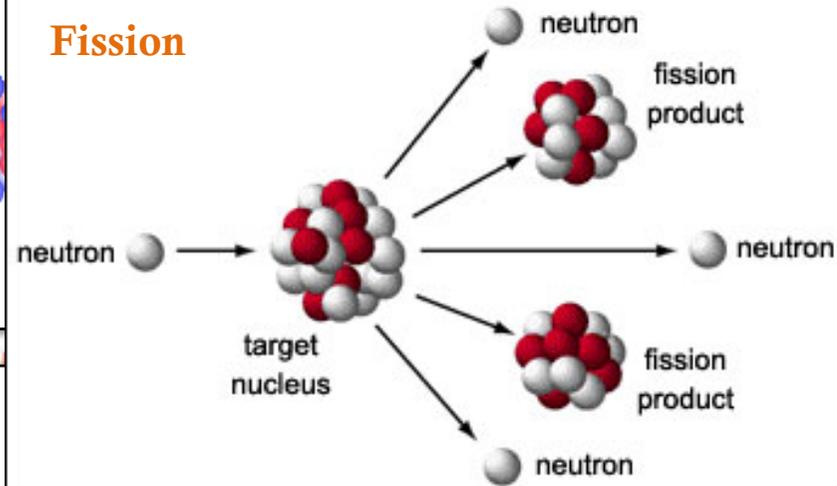
# COMMENT PRODUIRE DES NOYAUX EXOTIQUES ?

## (I) CHOISIR LE BON MÉCANISME

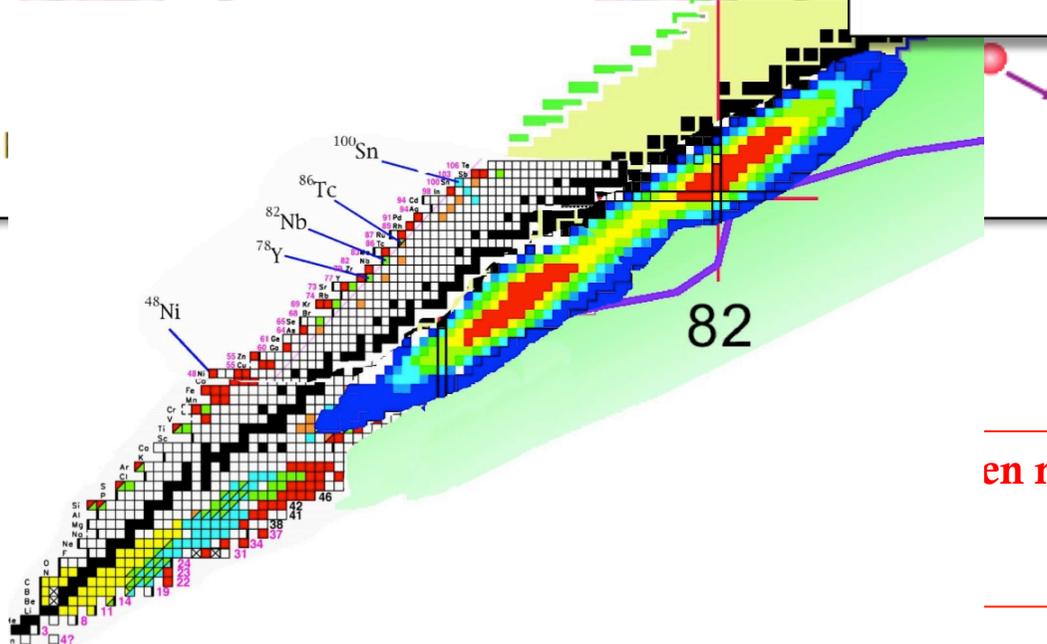
### Spallation



### Fission

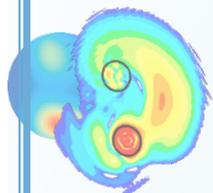


### Fragmentation

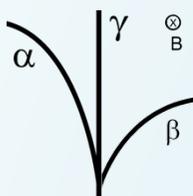


- Heavy ions
- Spallation
- Projectile Fragmentation

en neutrons

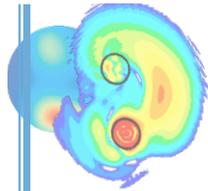


## COMMENT REJOIGNENT-ILS LA STABILITÉ ?



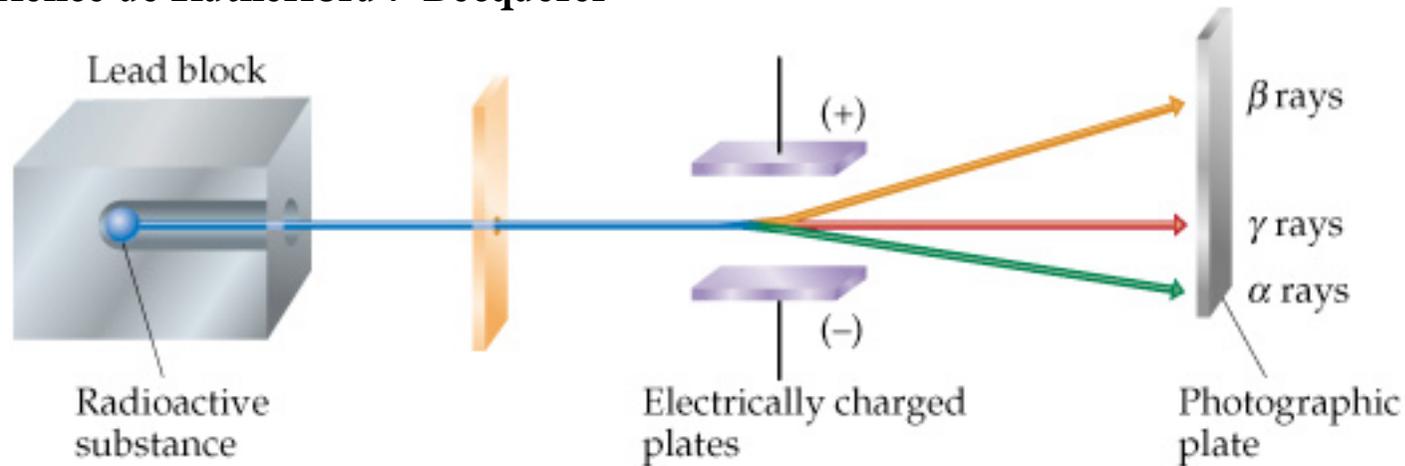
- ▶ Les décroissances  $\alpha$   $\beta$   $\gamma$ , qui choisit ?
- ▶ Le cas de la radioactivité alpha (impossible n'est pas quantique)





# POURQUOI PARLE-T-ON DE PARTICULES $\alpha$ , $\beta$ et rayonnement $\gamma$ ?

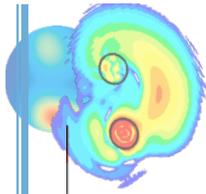
## Expérience de Rutherford / Becquerel



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

→ Tous les noyaux sont formés de particules  $\alpha$  et d'électrons

« (...) les rayons  $\alpha$  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  $6.103$  (...) Or  $e/m = 104$  pour l'atome d'hydrogène lors de l'électrolyse de l'eau. La particule qui constitue les rayons  $\alpha$  se comporte donc comme si sa masse était du même ordre que celle de l'atome d'hydrogène. » Rutherford et Soddy

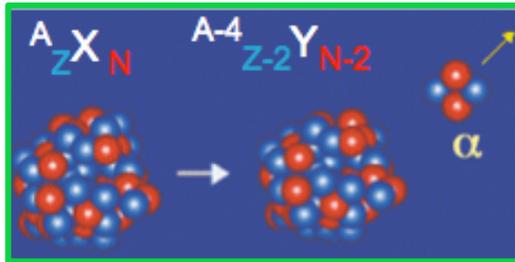


# CARTE DE DÉSINTÉGRATIONS DES NOYEAUX

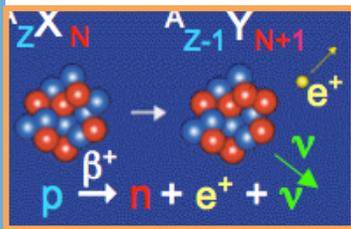
► **Condition de décroissance :**

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

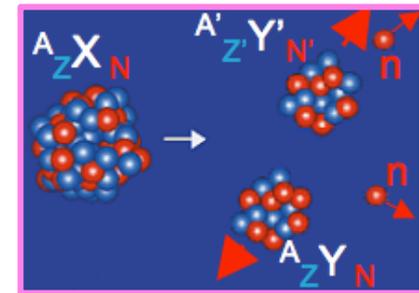
$$Q = M(\text{Père}) - [M(\text{Fils}) + M(\alpha, \beta, \dots)] > 0$$



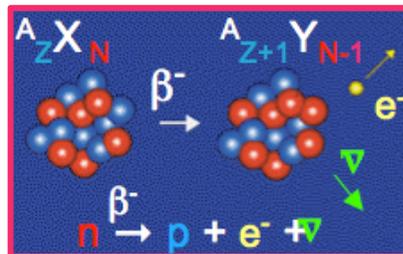
Désintégration  $\alpha$



Désintégration  $\beta^+$   
& capture  $e^-$

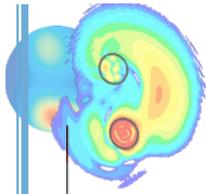


fission spontanée

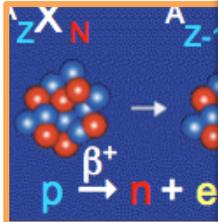


Désintégration  $\beta^-$

EMISSION	
■	STABLE
■	$\alpha$ ALPHA
■	p PROTON
□	EC $e^-$ CAPTURE
■	$\beta^+$ POSITRON
■	$\beta^-$ ELECTRON
■	n NEUTRON
■	SF (n)
●	FERTILE (SF)



# CARTE DE DÉSINTÉGRATIONS DES NOYAUX



Dés  
& ca

**Beta Minus Decay**

$${}^{14}_6\text{C} \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + e^- + \bar{\nu}$$

(beta particle)

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

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

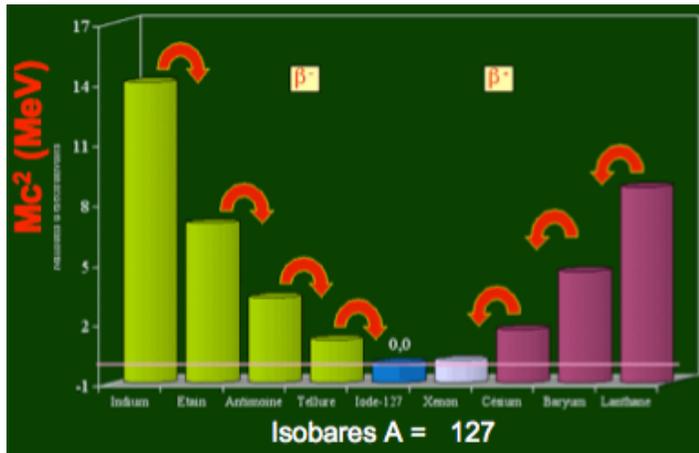
**Beta Plus Decay**

$${}^{18}_9\text{F} \rightarrow {}^{18}_8\text{O} + e^+ + \nu$$

(beta particle)

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

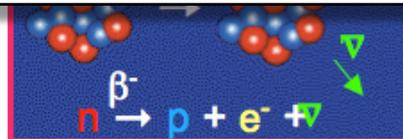
$${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^A_{Z-1}\text{Y} + e^+ + \nu$$



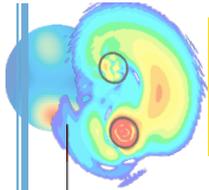
► Le proton libre ne décroît pas (d'après nos connaissances)

$$m_p < m_n + m_e$$

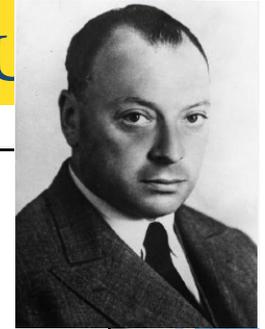
► Le neutron libre décroît en proton avec un temps de  $\frac{1}{2}$  vie de **10,5 min**



- n NEUTRON
- SF (n)
- FERTILE (SF)

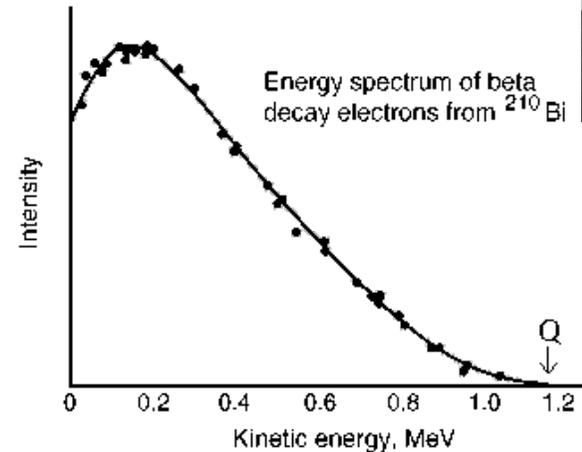


# CARTE DE DÉSINTÉGRATIONS DES NOYAU



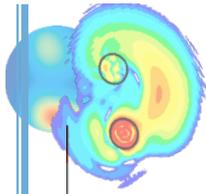
*Chers dames et messieurs radioactifs,*

*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.*

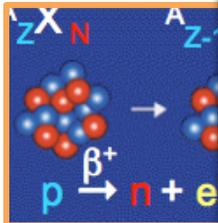


# CARTE DE DÉSINTÉGRATIONS DES NOYAUX

**Beta Plus Decay**

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

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



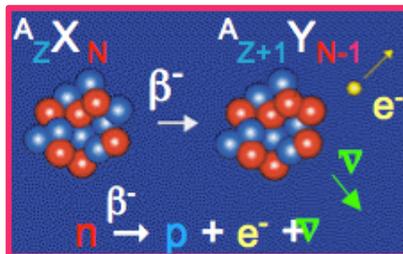
**Capture électronique**

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

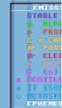
Dés  
& ca

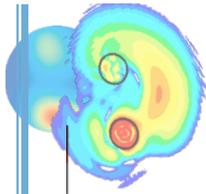
Compétition entre décroissance beta plus et capture électronique

## Désintégration $\beta^-$

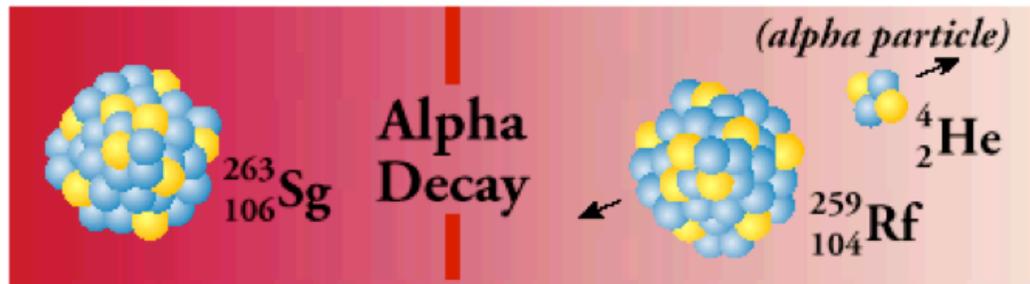


- $\alpha$  ALPHA
- p PROTON
- e<sup>-</sup> CAPTURE
- $\beta^+$  POSITRON
- $\beta^-$  ELECTRON
- n NEUTRON
- 5f (n)
- FERTILE (5f)



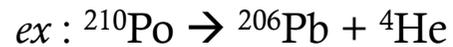


# CARTE DE DÉSINTÉGRATIONS DES NOYAUX



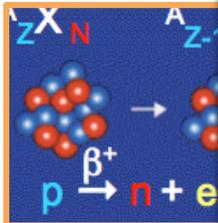
$$Q = B(N-2, Z-2) - B(N, Z) + B({}^4\text{He}) = B(\text{fils}) + B(\text{père}) - B({}^4\text{He})$$

$$\begin{aligned} \text{zone favorable} : B(N-2, Z-2) - B(N, Z) > 0 \\ \rightarrow B(A-4)/(A-4) \geq B(A)/A \end{aligned}$$

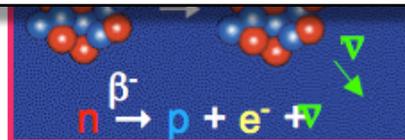


${}^{210}\text{Po} \quad Z/N = 84/126 = 0.667$

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



Désintégration  
& capture



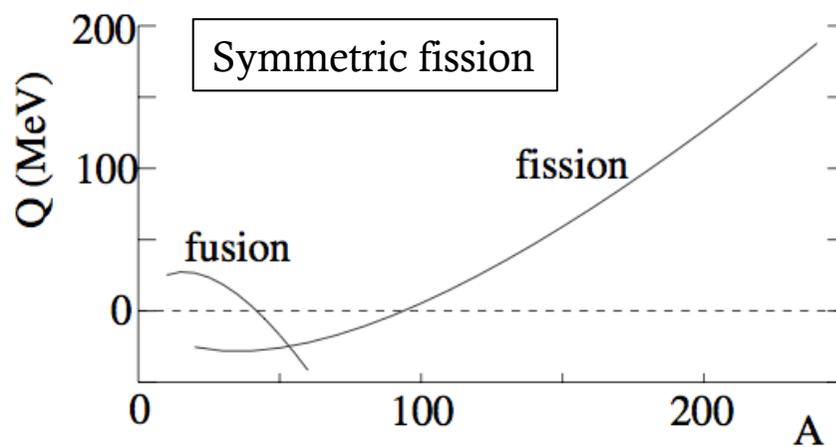
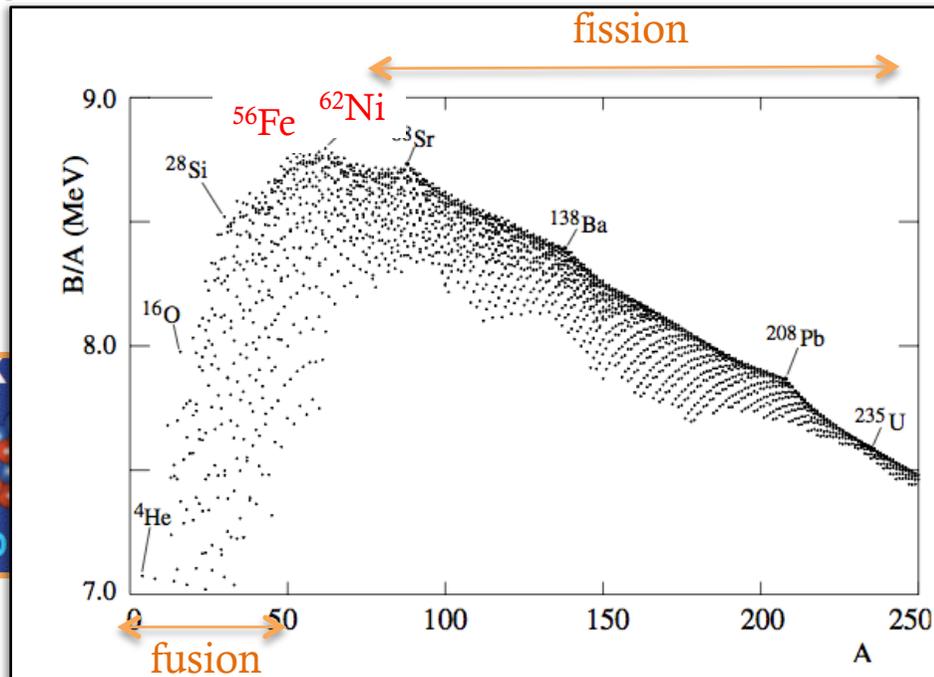
■ n NEUTRON  
 ■ 5F (n)  
 ● FERTILE (5F)

ée

▼  
 n  
 ▲

■ 5F (n)  
 ● FERTILE (5F)

# CARTE DE DÉSINTÉGRATIONS DES NOYAUX



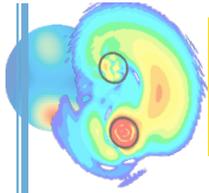
## Fission spontanée

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

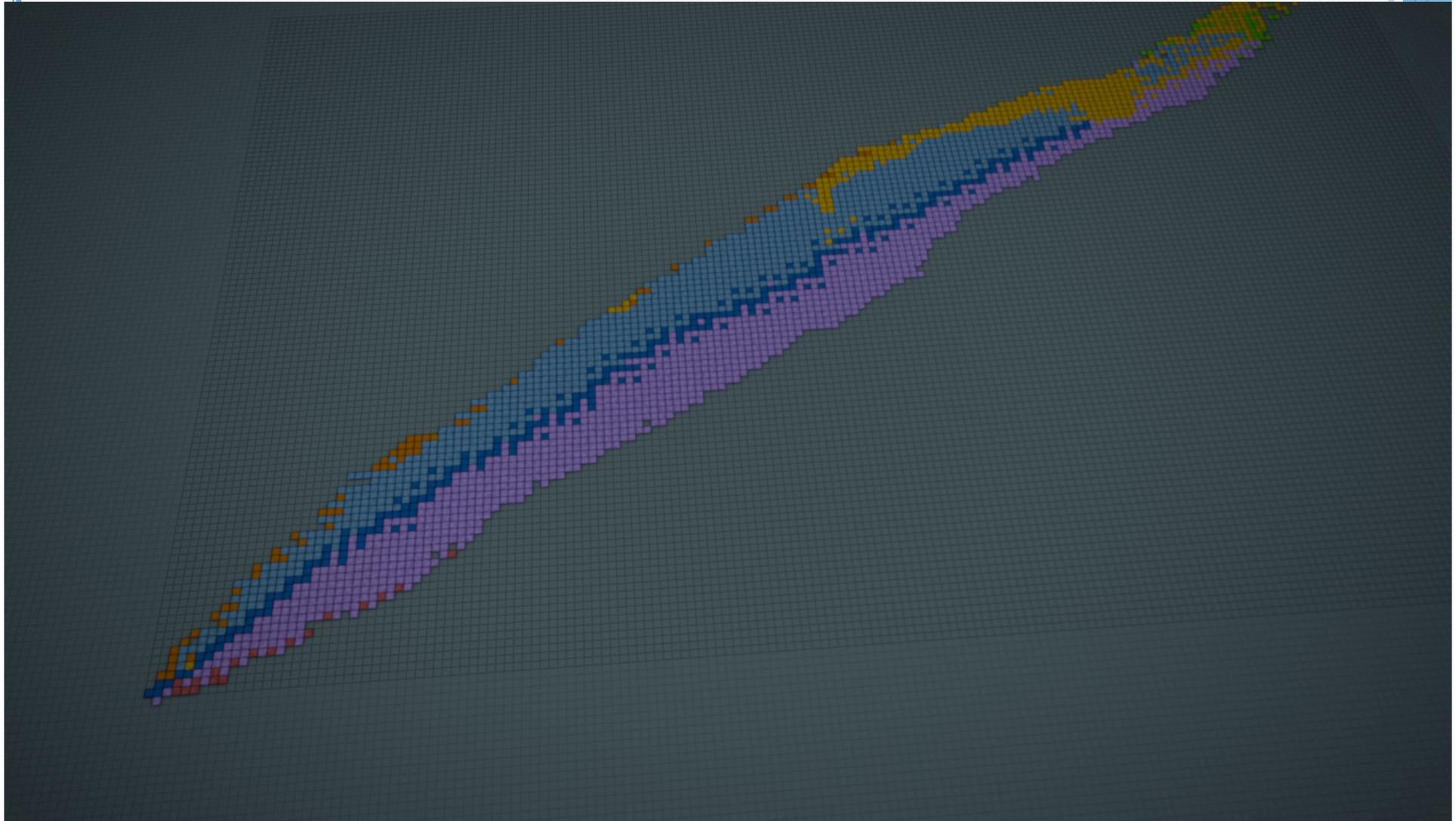
$B(A) > B(A)$  : légers  
 → favorise la prise de matière  
 (fusion)

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

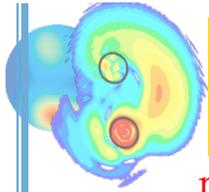
**fission  $A \sim 240$**



# CARTE DE DÉSINTÉGRATIONS DES NOYEAUX

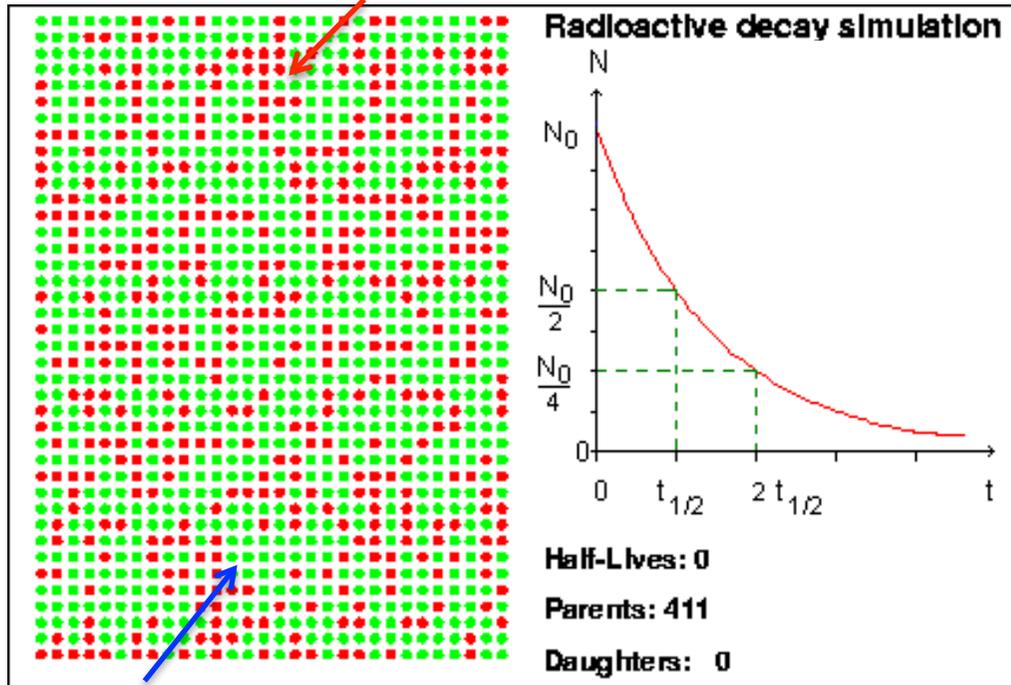


source : <http://irfu.cea.fr/la-vallee-de-stabilite/>



# LA DÉCROISSANCE RADIOACTIVE

noyaux radioactifs (père)



noyaux fils

Lors de la décroissance sont conservés :

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

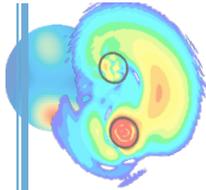
**Phénomène statistique (aléatoire) !**

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 :  $dN = -\lambda N dt$  ( $\lambda$  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 décréu  $T_{1/2} = \ln(2)/\lambda$
- ▶ **Activité :** nombre de désintégrations par unité de temps :  $A(t) = \lambda N(t)$

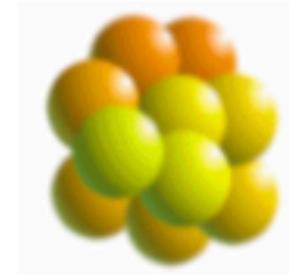


# POURQUOI UNE DURÉE DE VIE ?

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  $\alpha$  :

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

émission  $\alpha \Leftrightarrow$  fusion avec un  $\alpha$

D'où

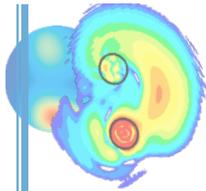
fusion spontanée impossible  $\Leftrightarrow$  répulsion coulombienne des noyaux

$\Leftrightarrow$  émission  $\alpha$  spontanée impossible

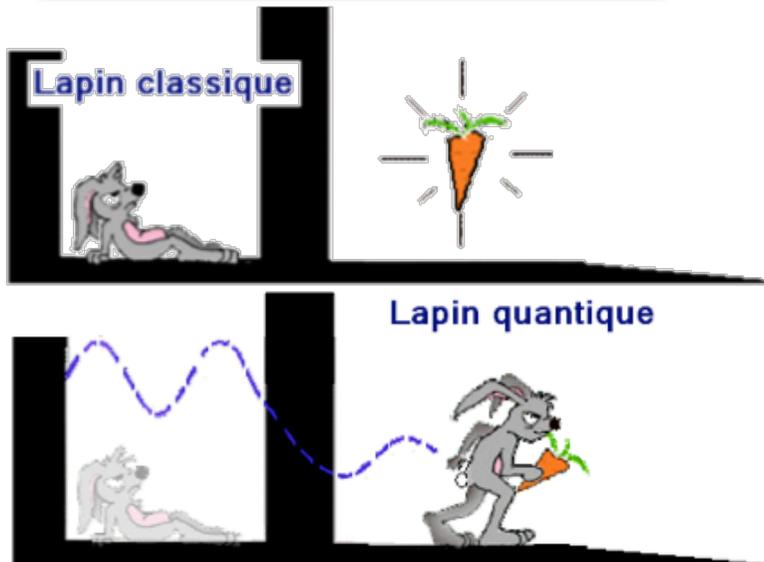
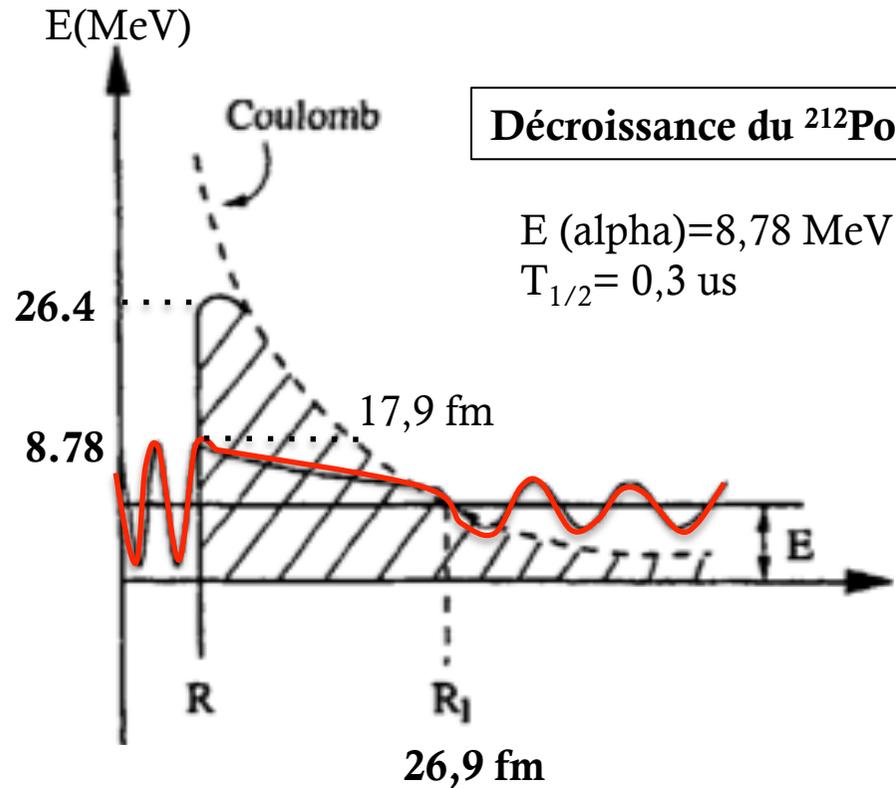
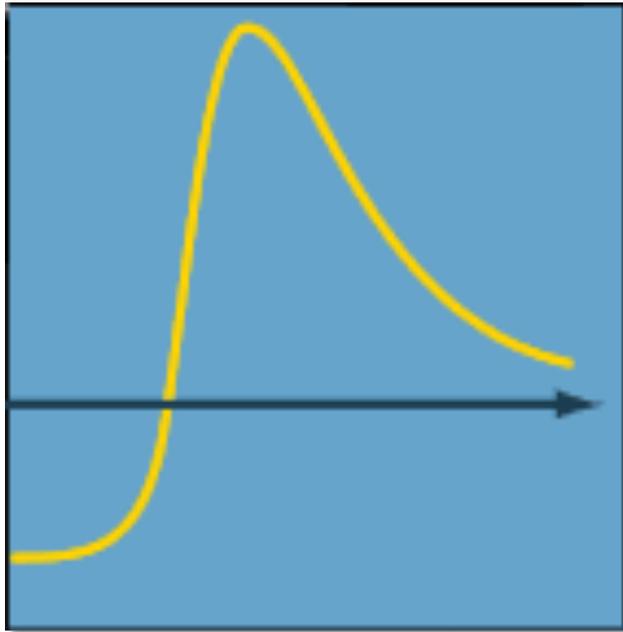
**Mais** : classiquement barrière trop haute

$\Rightarrow$  effet quantique de traversée de barrière : effet tunnel

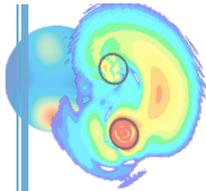
Pour  $\beta$  : pas de renversement du sens du temps, pas de  $\beta$  pré-formé dans le noyau  
la durée vient du fait que l'événement est peu probable car interaction **faible**



# IMPOSSIBLE N'EST PAS QUANTIQUE

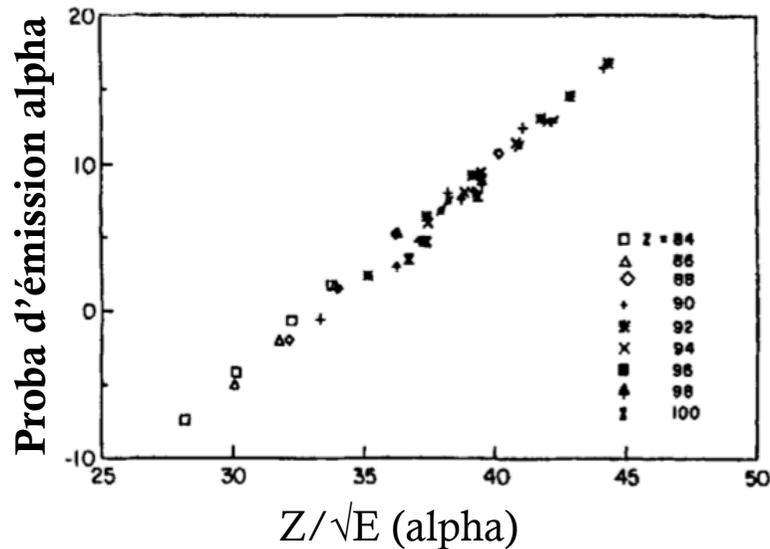
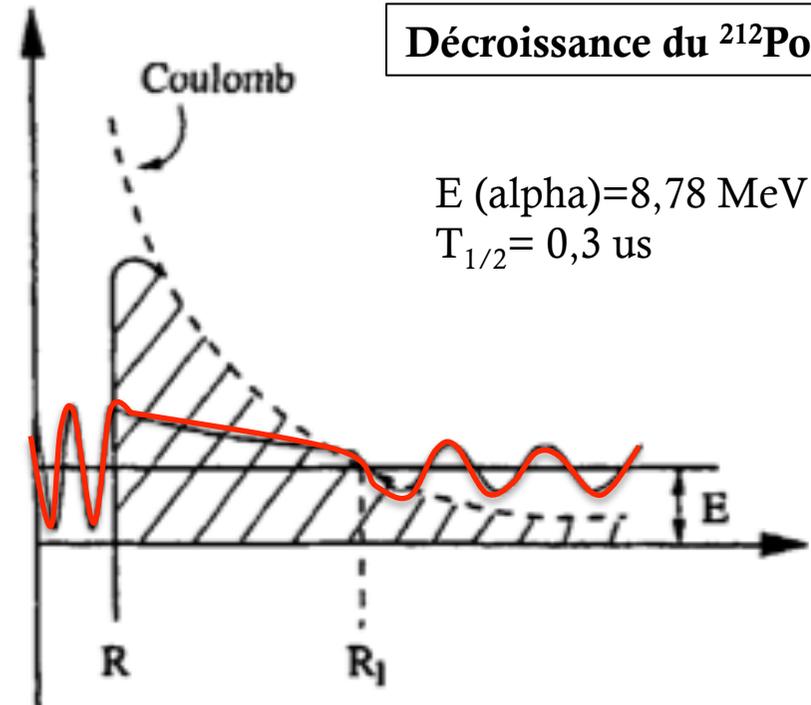


Hauteur barrière	26.4 MeV
Rayon où la barrière tombe à l'énergie de l'alpha	26,9 fm
Largeur de la barrière vue par l'alpha	17,9 fm
Fréquence de collision de l'alpha sur la barrière	$1,1 \cdot 10^{21}/\text{s}$



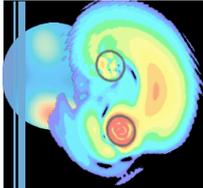
# IMPOSSIBLE N'EST PAS QUANTIQUE

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



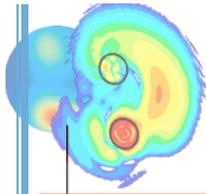


# INTERMÈDE QUANTIQUE

L'appartement quantique – L'effet Tunnel

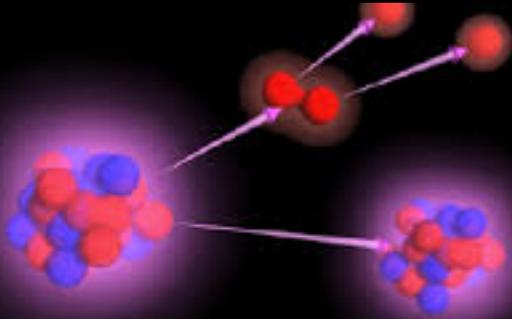


*source : Natacha Poutoux*

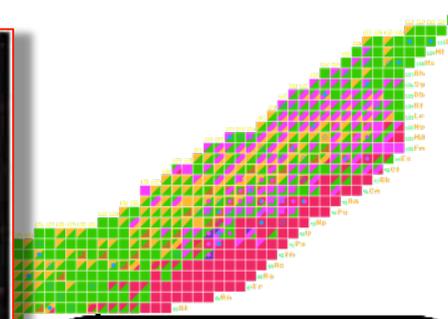
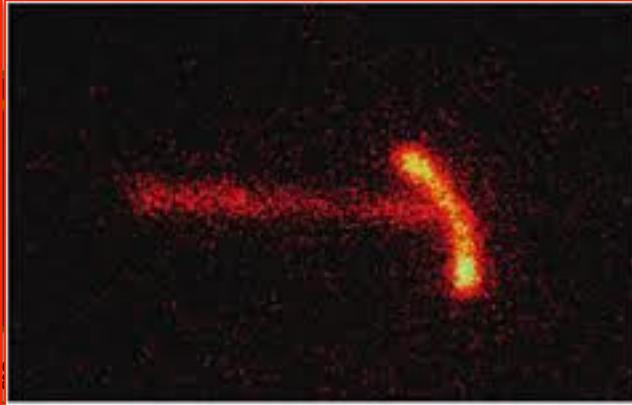


# DE NOUVEAUX MODES DE DÉCROISSANCE ?

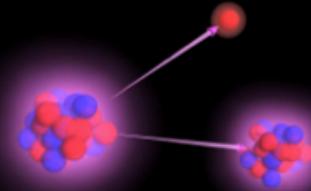
$^{45}\text{Fe}$ ,  $^{54}\text{Zn}$ ,  $^{19}\text{Mg}$  two-proton decay



découverte en 2000



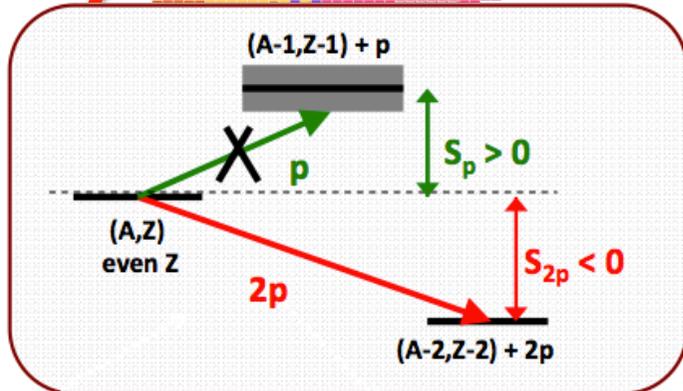
1p radioactivity



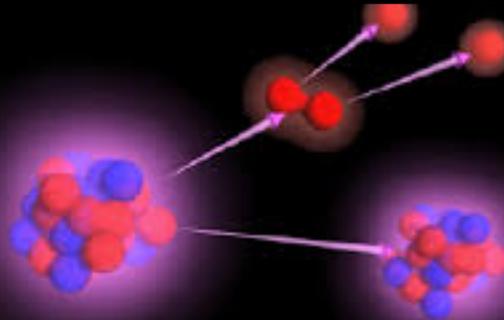
discovered in 1981

## Questions débattues :

est-ce que les 2 protons (ou 2n) sont émis simultanément (vraie radioactivité 2p) ou de façon séquentielle ?

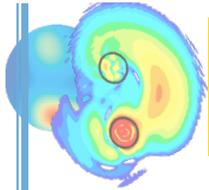


$^{16}\text{Be}$  : two neutron decay



découverte en 2012





# MESURE DES DÉCROISSANCES 2P

## Décroissance du noyau après implantation :

- ⇒ temps implantation -> décroissance
- ⇒ énergie des gamma et beta

### Energie des protons

Efficacité détecteur ~ 99 %  
empilement avec  $\beta$  ( $\Delta E$ )

### B Coincidences :

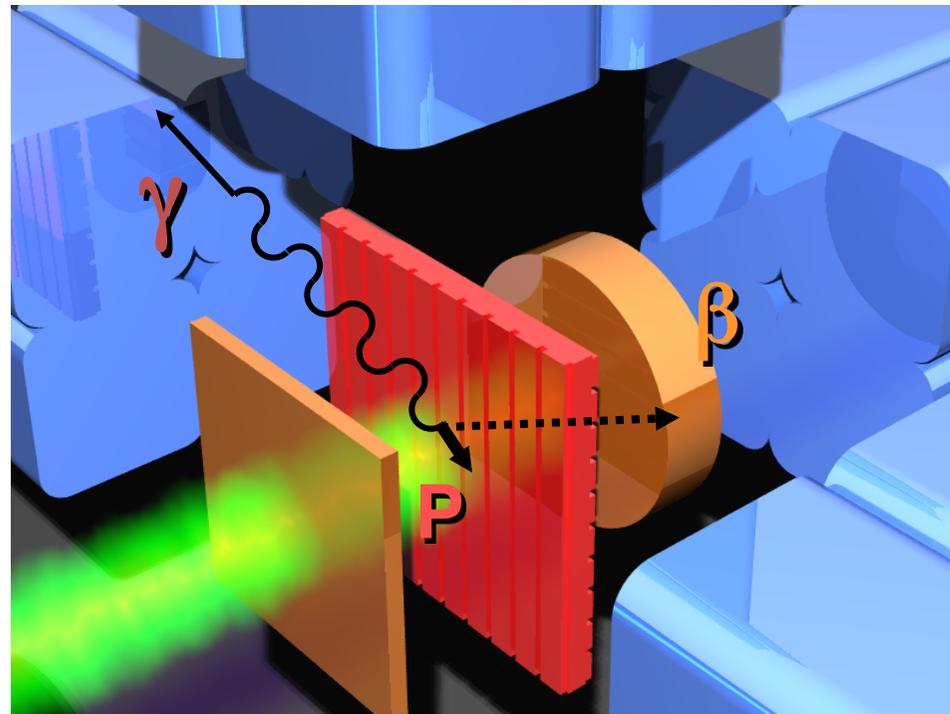
pistes voisines Si ~ 30/40 %

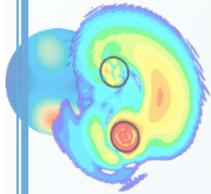
### Détecteurs Germanium

spectroscopie  $\beta$ - $\gamma$ ,  $\beta$ -p- $\gamma$

implantation → décroissance

*corrélation spatiale*  
*corrélation en temps*

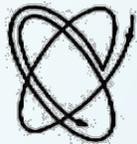




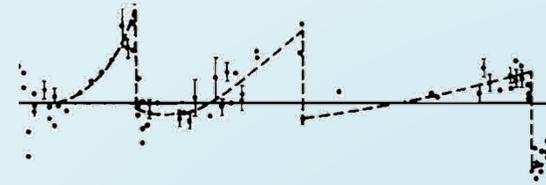
## COMMENT MODÉLISER LE NOYAU ? (II)

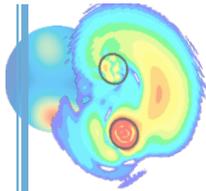


- ▶ **Le modèle de Fermi**
- ▶ **La recherche de motifs répétitifs**
- ▶ **L'approche microscopique**

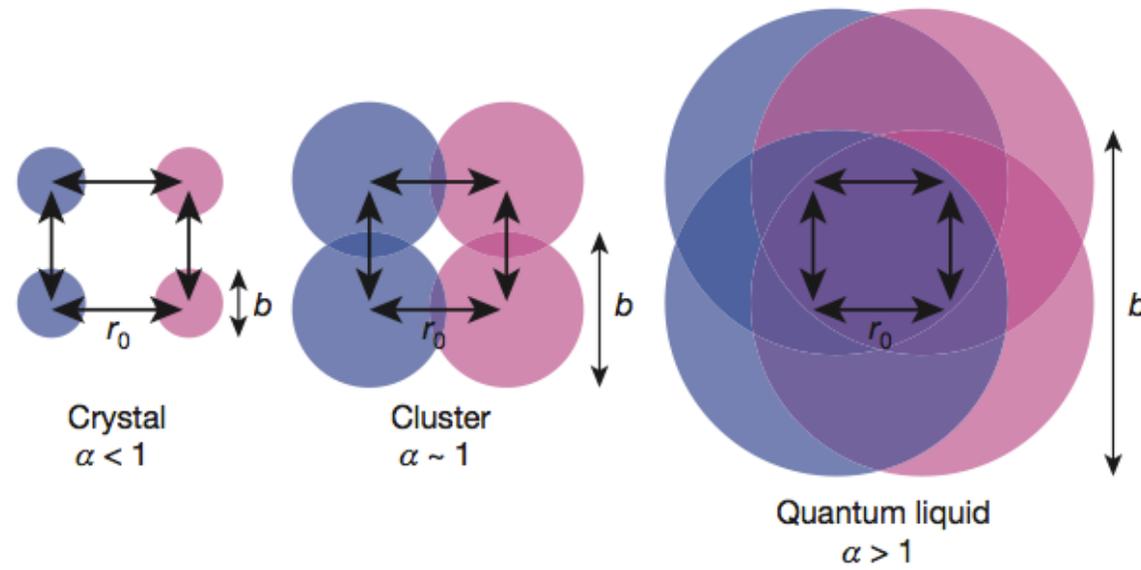


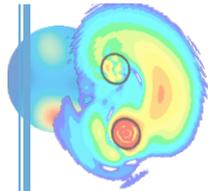
- le modèle en couches
- succès & limites
- ▶ **Les approches de champ moyen**





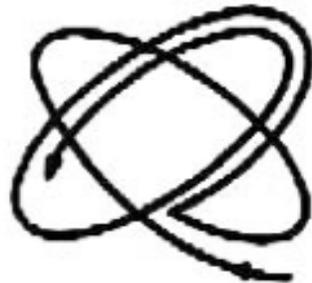
# LE NOYAU : GAZ OU LIQUIDE ?





# 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

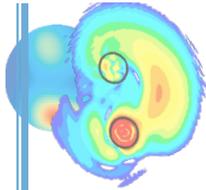


Le modèle en couches

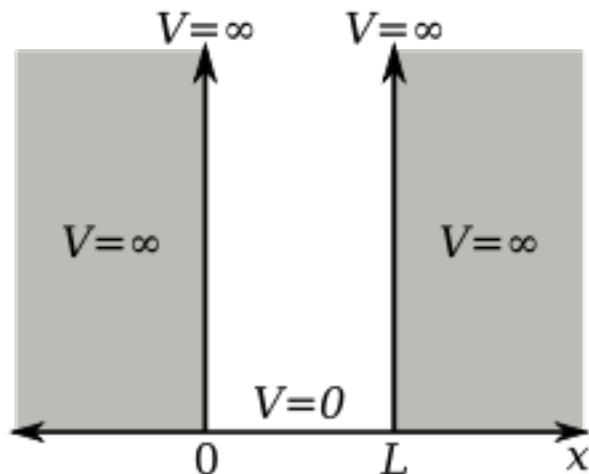
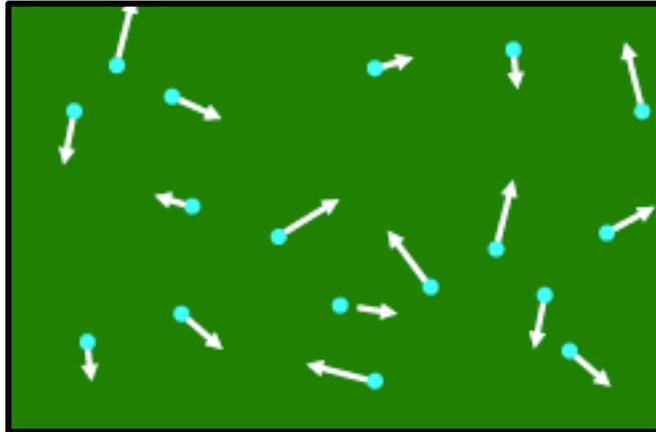


Le modèle de Fermi

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) :

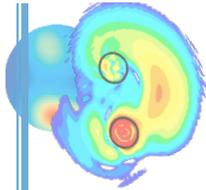
2 fermions indiscernables ne peuvent pas être  
simultanément dans le **même état quantique**

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

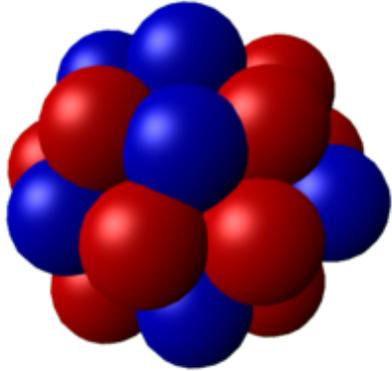
→ **Les nucléons sont comme libres dans le noyau**  
**libre parcours moyen  $\sim$  taille du noyau**

► 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

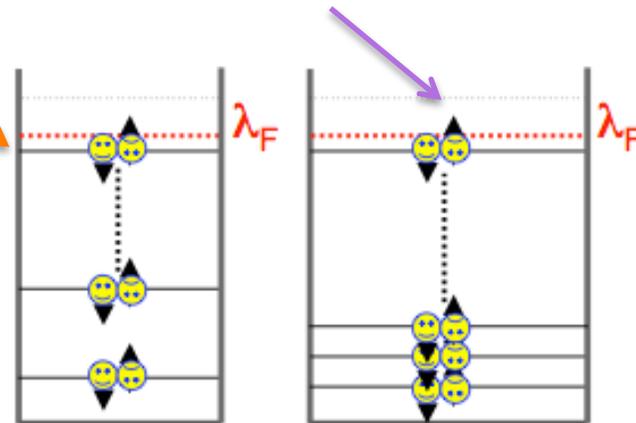
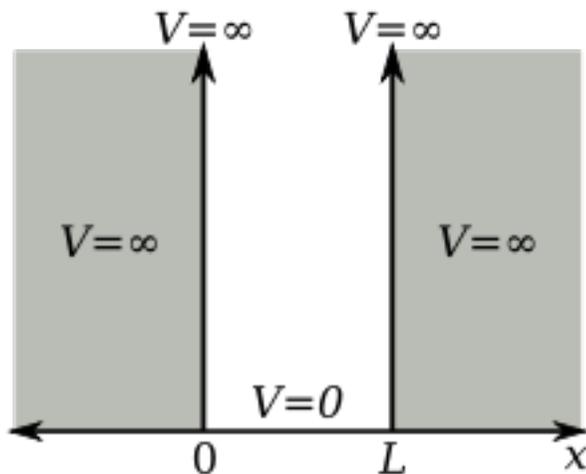


Les nucléons du noyau ne sentent que les bords du noyau  
→ **boîte avec des bords infinis** (= puits carré)

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

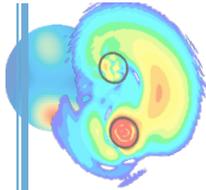
profondeur du puits :  $\varepsilon_F + 8 \text{ MeV}$  (constante)

dernier état occupé  
 $\varepsilon_F$  (dépend de la densité)



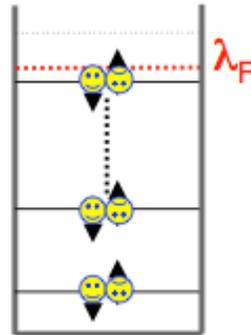
Si A augmente, le volume du noyau augmente mais la **profondeur est constante**

→ 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

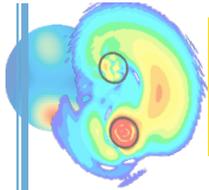


mais plutôt ...



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)

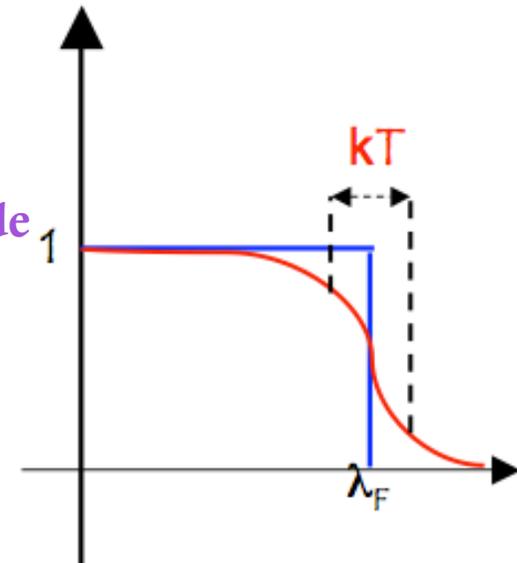


# SUCCÈS ET LIMITES DU MODÈLE DE FERMI

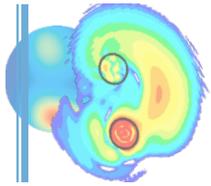
- ▶ permet de justifier les paramètres pour la goutte liquide
- ▶ résultats en accord avec l'expérience :
  - profondeur de puits constante  $\rightarrow$  densité constante  $\rightarrow$  saturation
- ▶ insertion de la MQ

## 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...)**





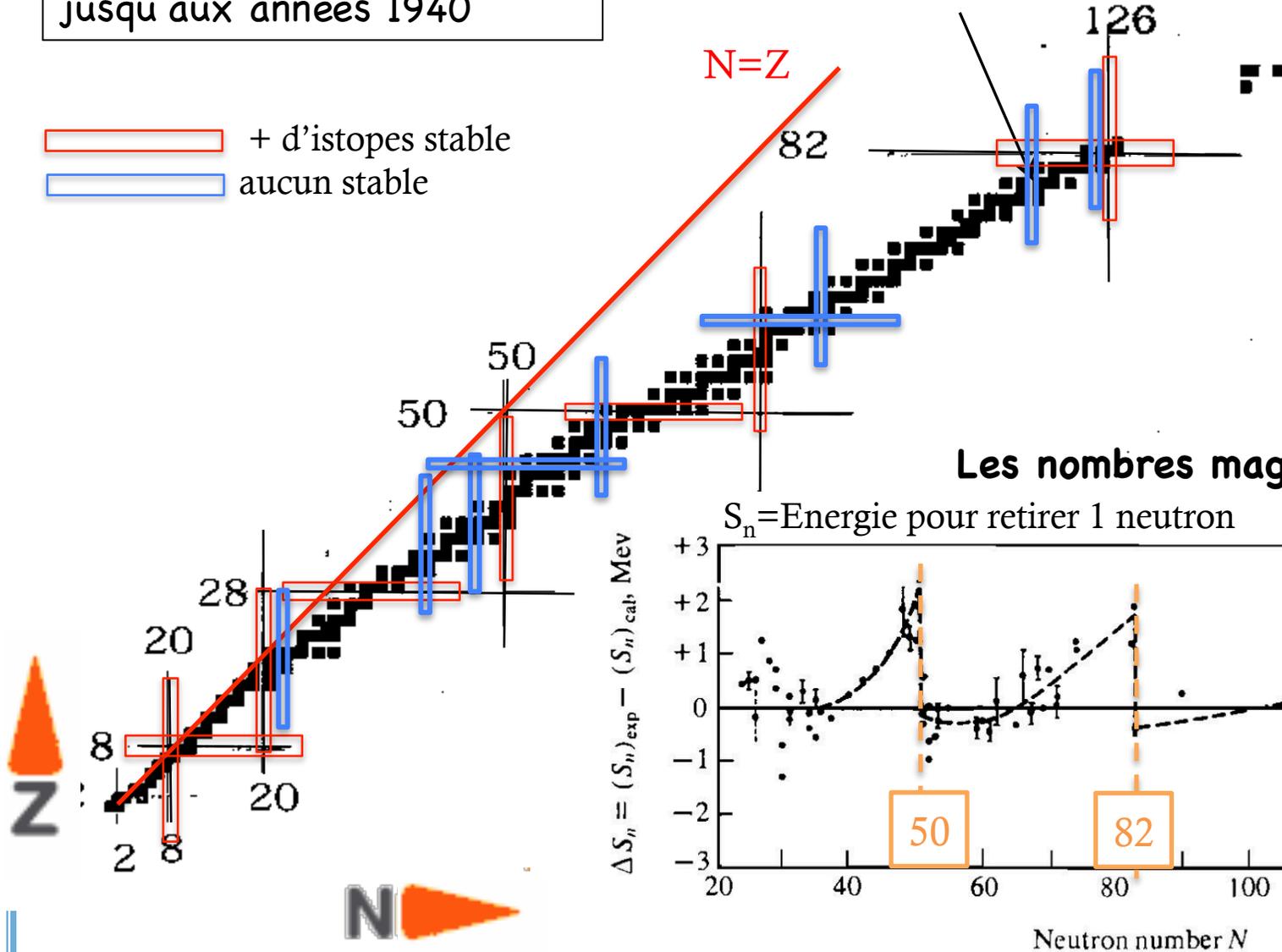


# LA DÉCOUVERTE DU MODÈLE EN COUCHES

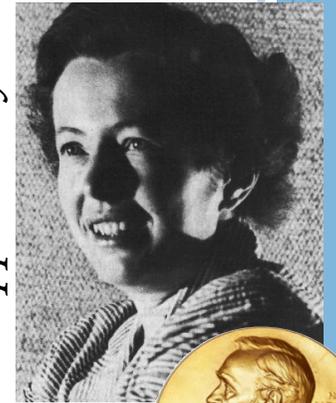
Ensemble des noyaux connus jusqu'aux années 1940

- + d'isotopes stable
- aucun stable

Noyaux stables

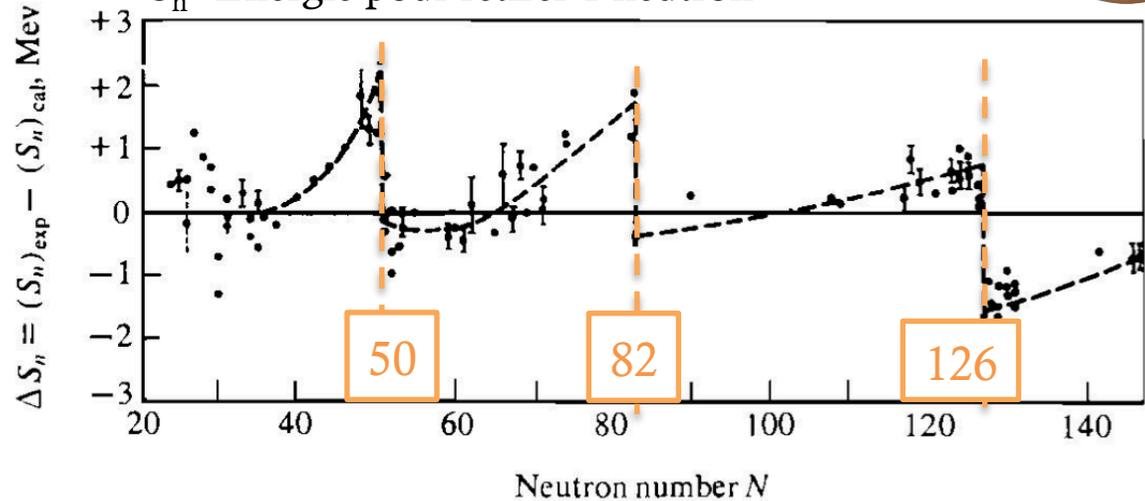


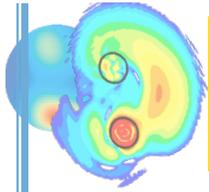
Goepfert-Mayer



Les nombres magiques

$S_n$  = Energie pour retirer 1 neutron

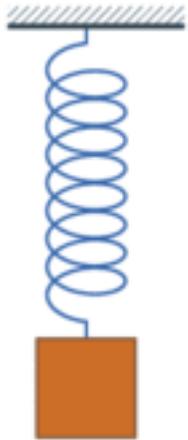




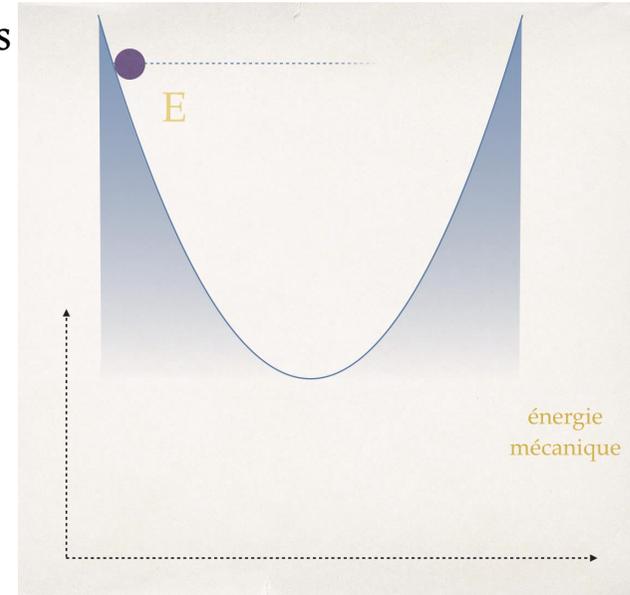
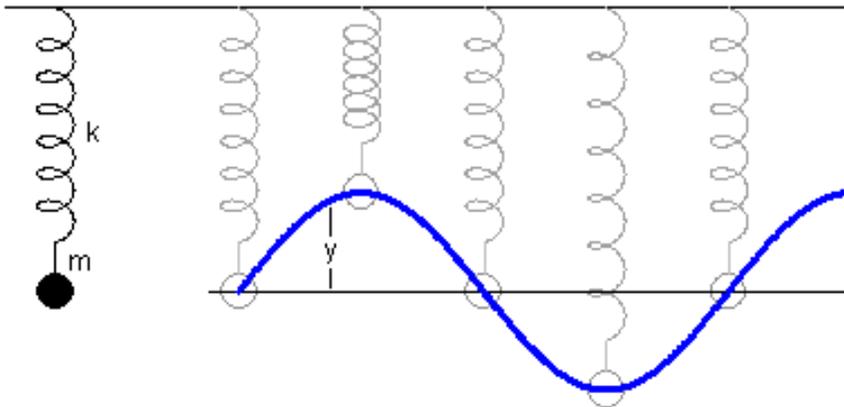
# LE POTENTIEL HARMONIQUE (CLASSIQUE)

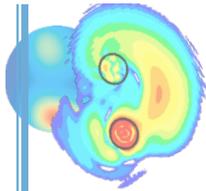
- ▶ Il faut améliorer le potentiel !
  - les bords infinis ne sont pas réalistes
  - on ne pourrait pas arracher des nucléons car le  $S_n$  serait infini !

## ▶ 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

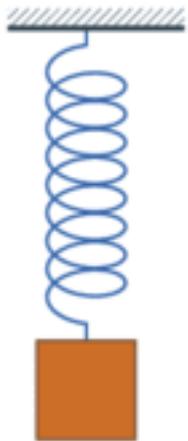




# LE POTENTIEL HARMONIQUE (QUANTIQUE)

- ▶ 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 !

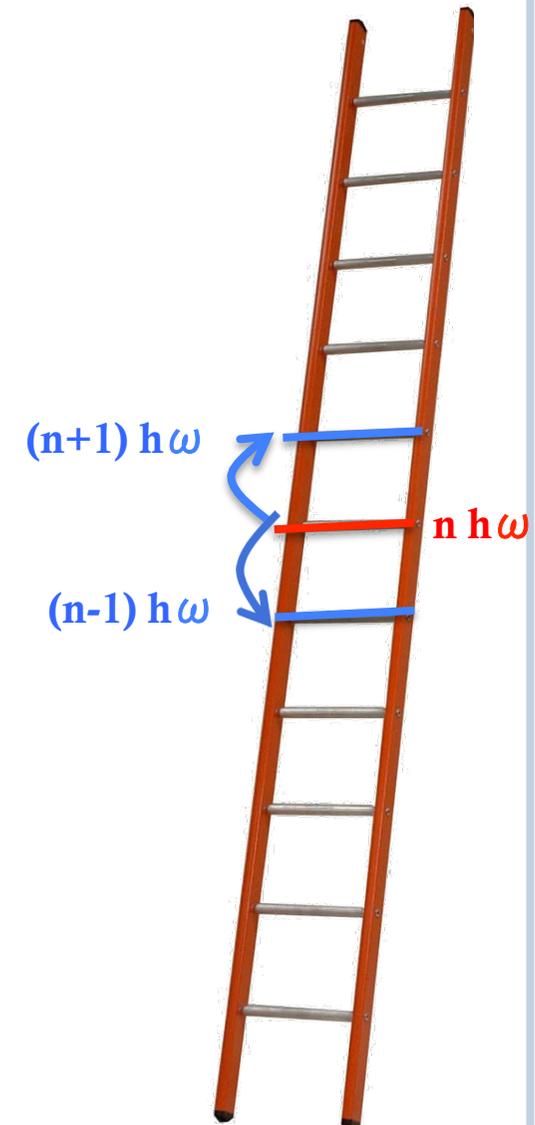
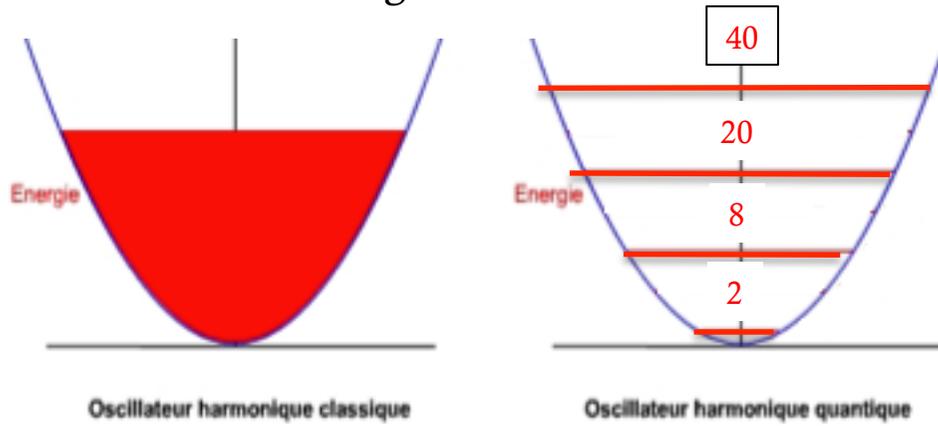
## ▶ Potentiel harmonique

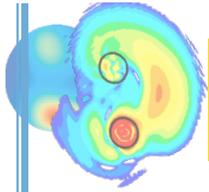


l'évolution décrite par une **sinusoïde** dont la **fréquence** ne dépend que des caractéristiques du système et l'**amplitude est constante**.

→ Modèle quantique

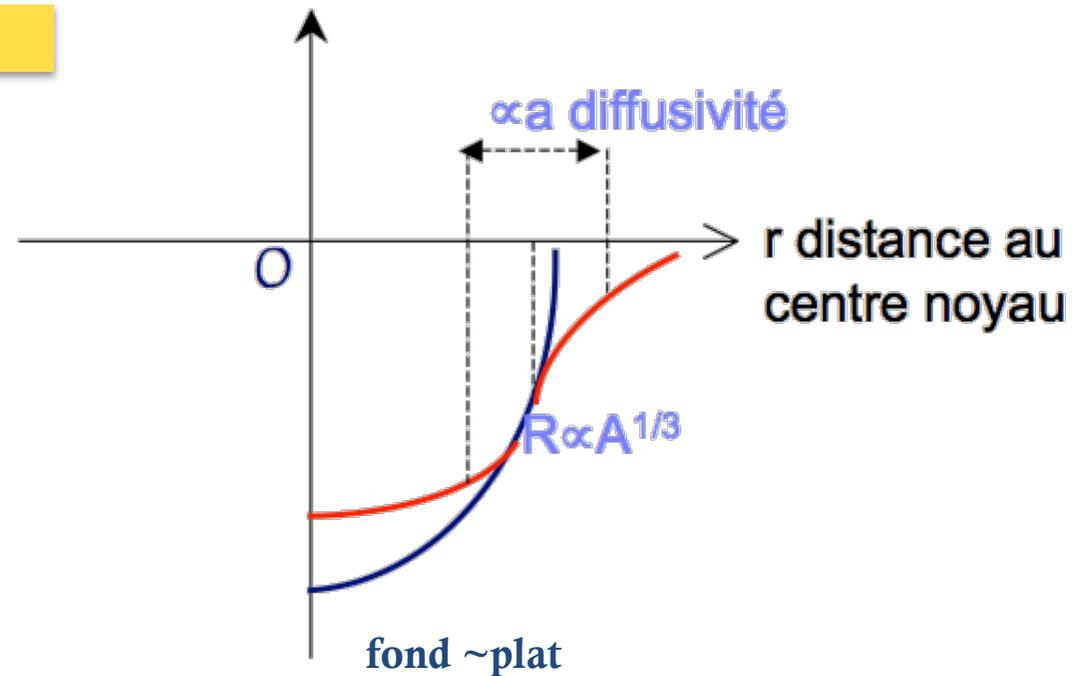
couches régulières :  $E = n h \omega$

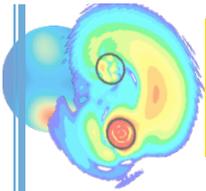




## UN POTENTIEL PLUS RÉALISTE : LE WOODS-SAXON

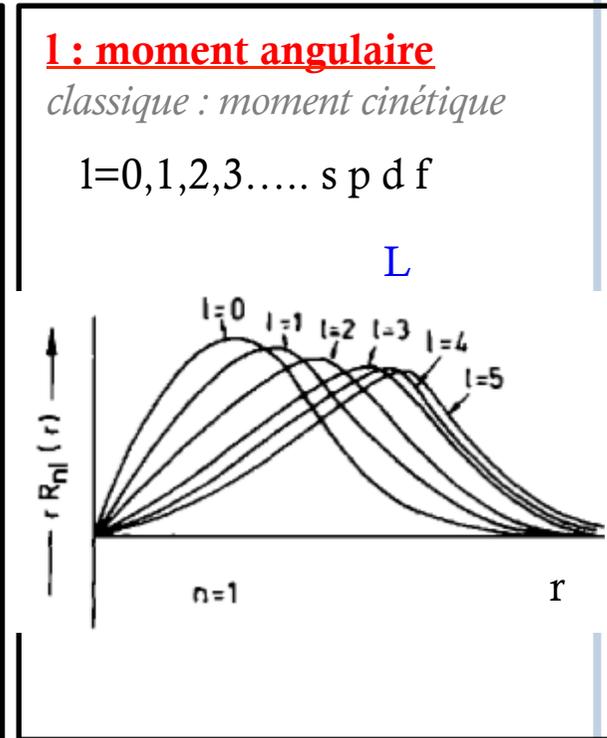
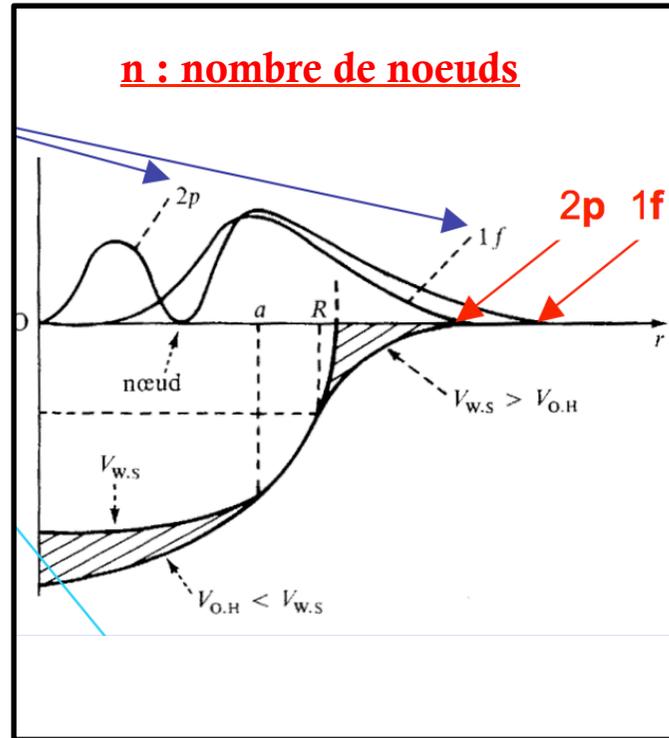
- ▶ Il faut améliorer le potentiel !
  - les bords infinis ne sont pas réalistes
    - on ne pourrait pas arracher des nucléons
  - les bords du puits ne sont pas « droits »
    - le noyau a des **bords diffus** (proche de la distribution de densité du noyau)
- ▶ Potentiel de Woods-Saxon



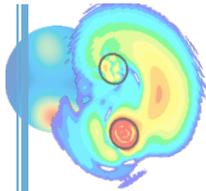


# LES NOMBRES MAGIQUES ET LE WS

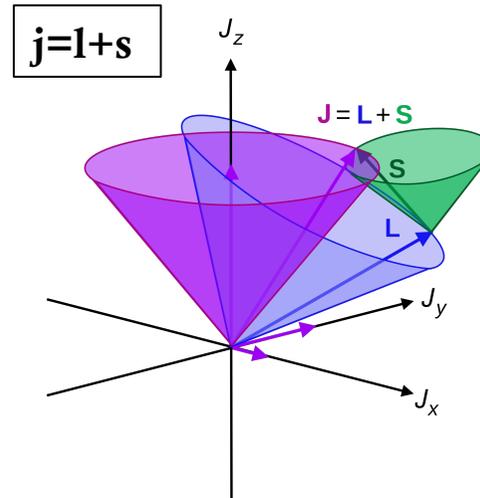
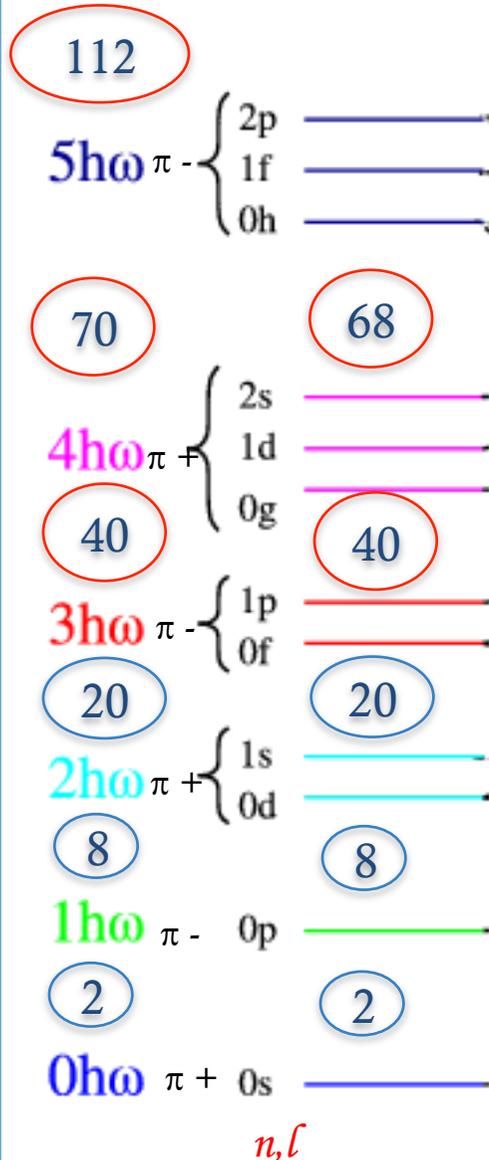
N	$n \ell$							
112								
5h $\omega$	$\pi -$	<table border="0"> <tr><td>2p</td><td>—————</td></tr> <tr><td>1f</td><td>—————</td></tr> <tr><td>0h</td><td>—————</td></tr> </table>	2p	—————	1f	—————	0h	—————
2p	—————							
1f	—————							
0h	—————							
70		68						
4h $\omega$	$\pi +$	<table border="0"> <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 $\omega$	$\pi -$	<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 $\omega$	$\pi +$	<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 $\omega$	$\pi -$	0p						
2		2						
0h $\omega$	$\pi +$	0s						



<b>n = principal</b>	<b>l = angulaire</b>	<b>m = magnétique</b>	<b>s = spin</b>
distance du noyau	forme du nuage	orientation spatiale	sens de rotation

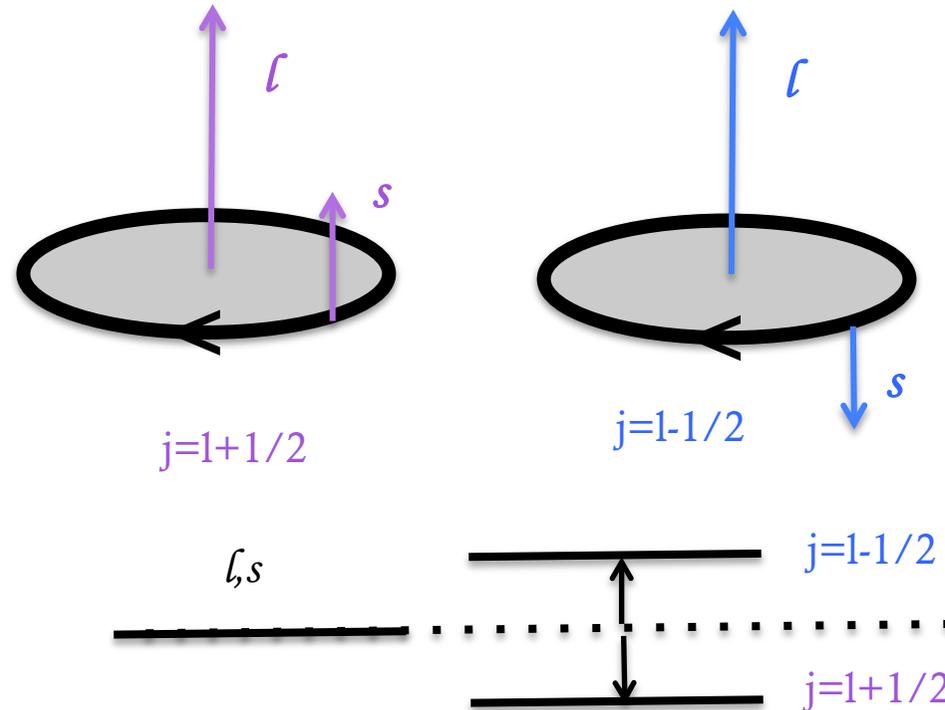


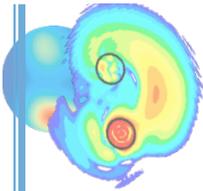
# IL MANQUE QUELQUE CHOSE : LE SPIN-ORBITE



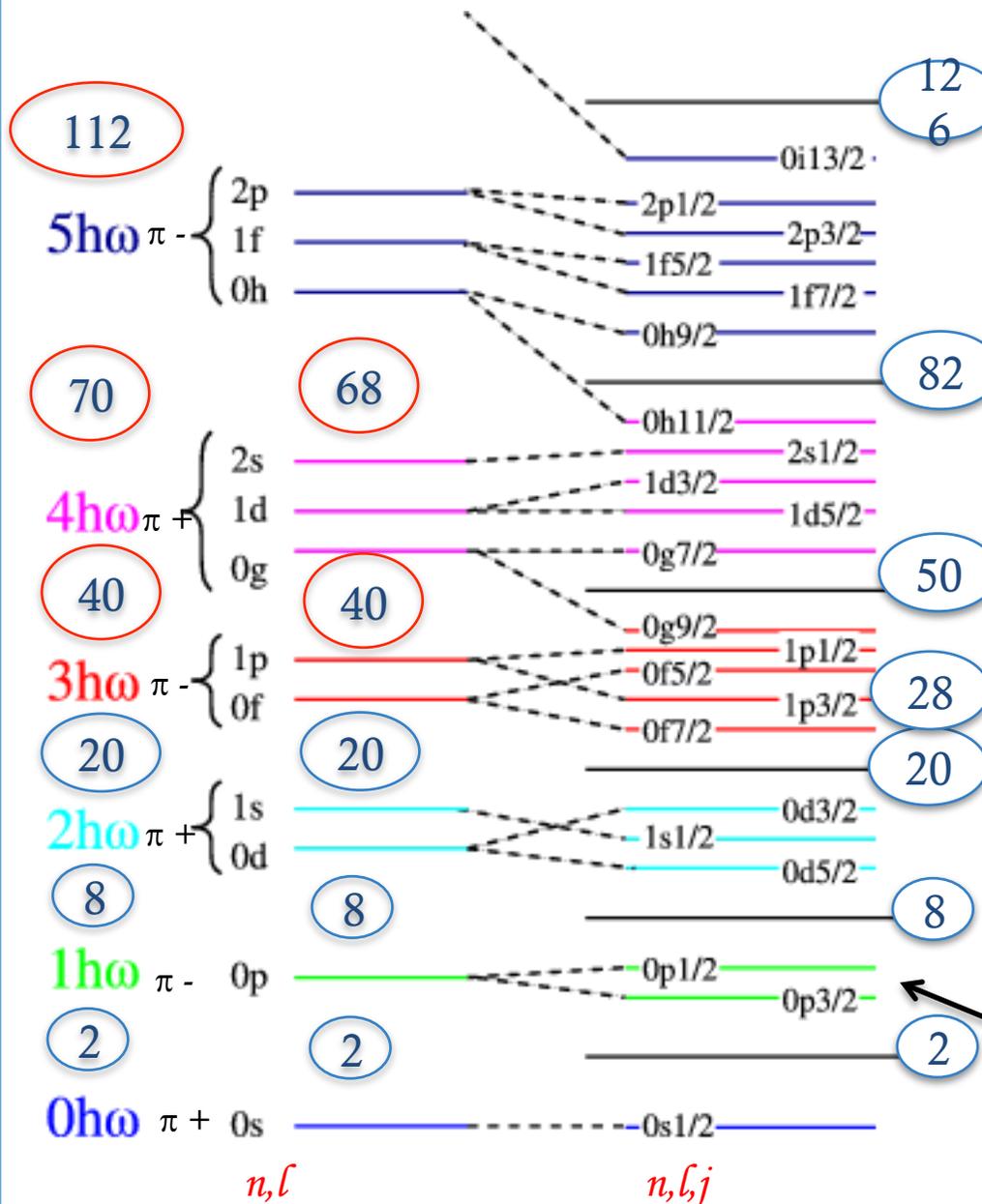
• **Spin-orbite** = interaction du spin avec le mouvement

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

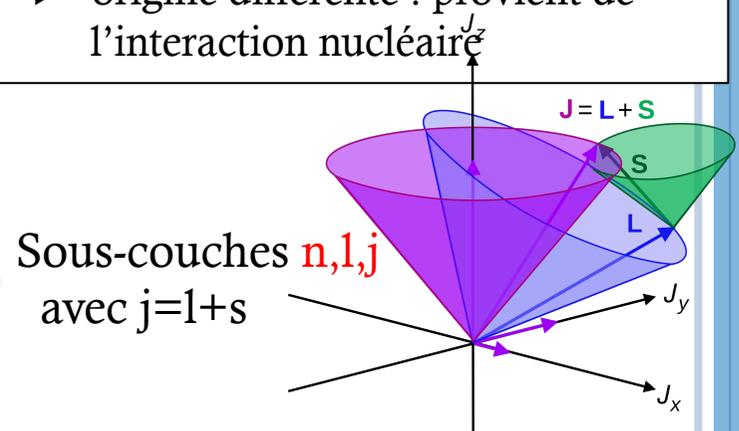


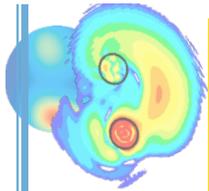


# IL MANQUE QUELQUE CHOSE : LE SPIN-ORBITE



- **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

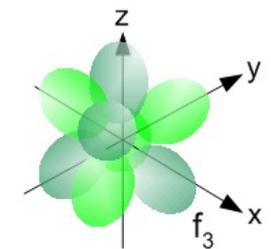
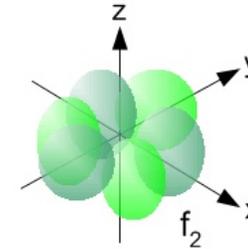
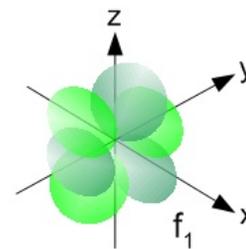
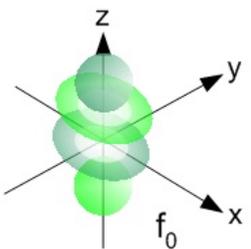
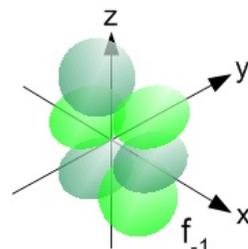
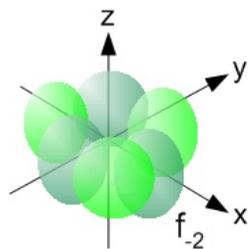
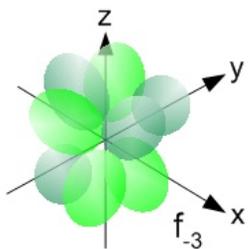
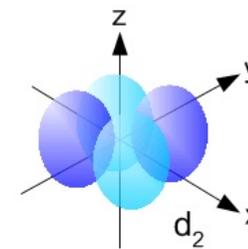
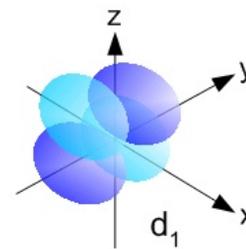
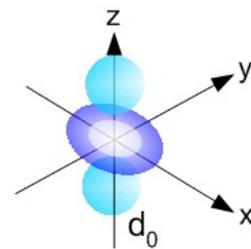
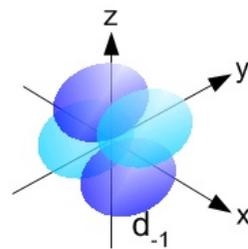
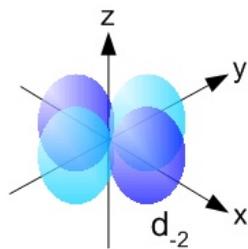
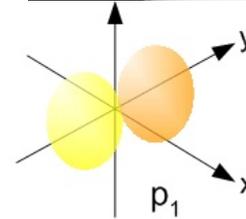
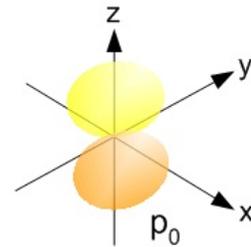
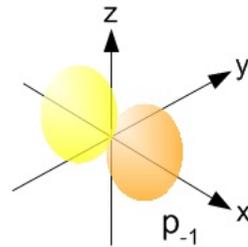
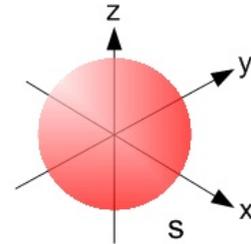


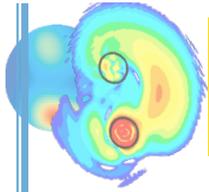


# QUELQUES EXEMPLES D'ORBITALES, POUR SE DÉTENDRE

$n$  = nombre de nœuds radiaux

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

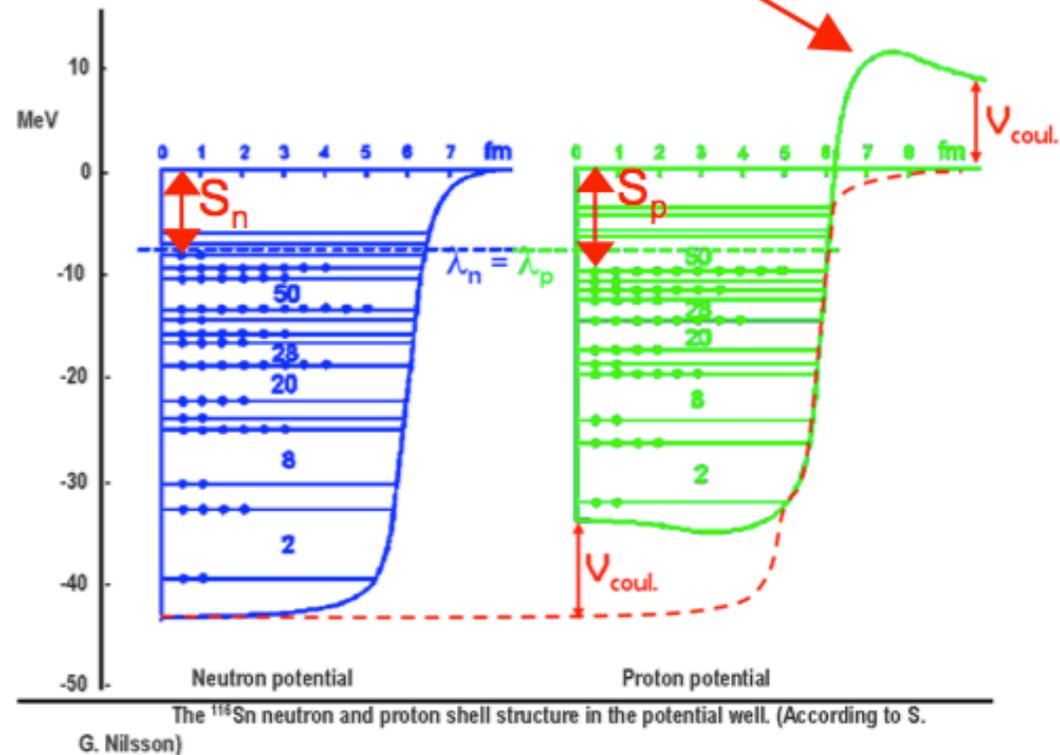




# LE MODÈLE EN COUCHES SPHÉRIQUE (PROTONS)

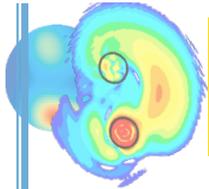
**côté protons:** il faut ajouter le potentiel coulombien  $V_{\text{coul}}$  (répulsion électrique)  
↔ les couches proton et neutron éloignées  
(Rq:  $V_{\text{coul}}$  effet important en surface ↔ barrière coulombienne)

**Pour les noyaux sphériques**  
si magique en neutrons (protons)  
⇒ couche remplie et au dessus:  
| gap ↔ stabilité.



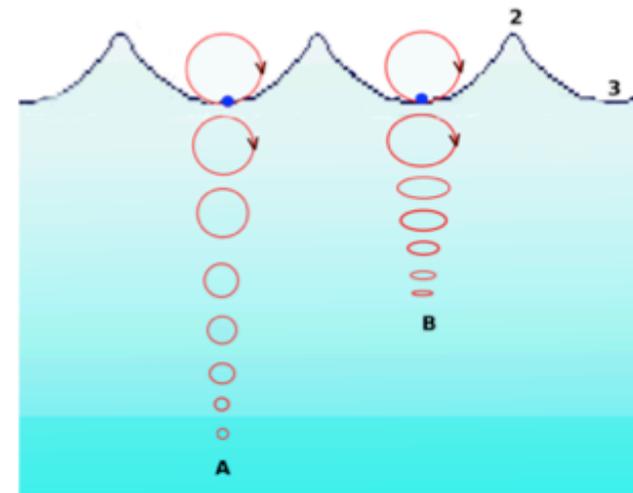
**Courage, on y est presque !**

Noyau ≡ composition de tous ces états individuels de nucléons.



## 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

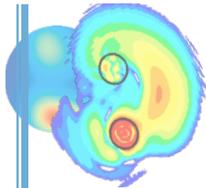


Classique:

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

Quantique:

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

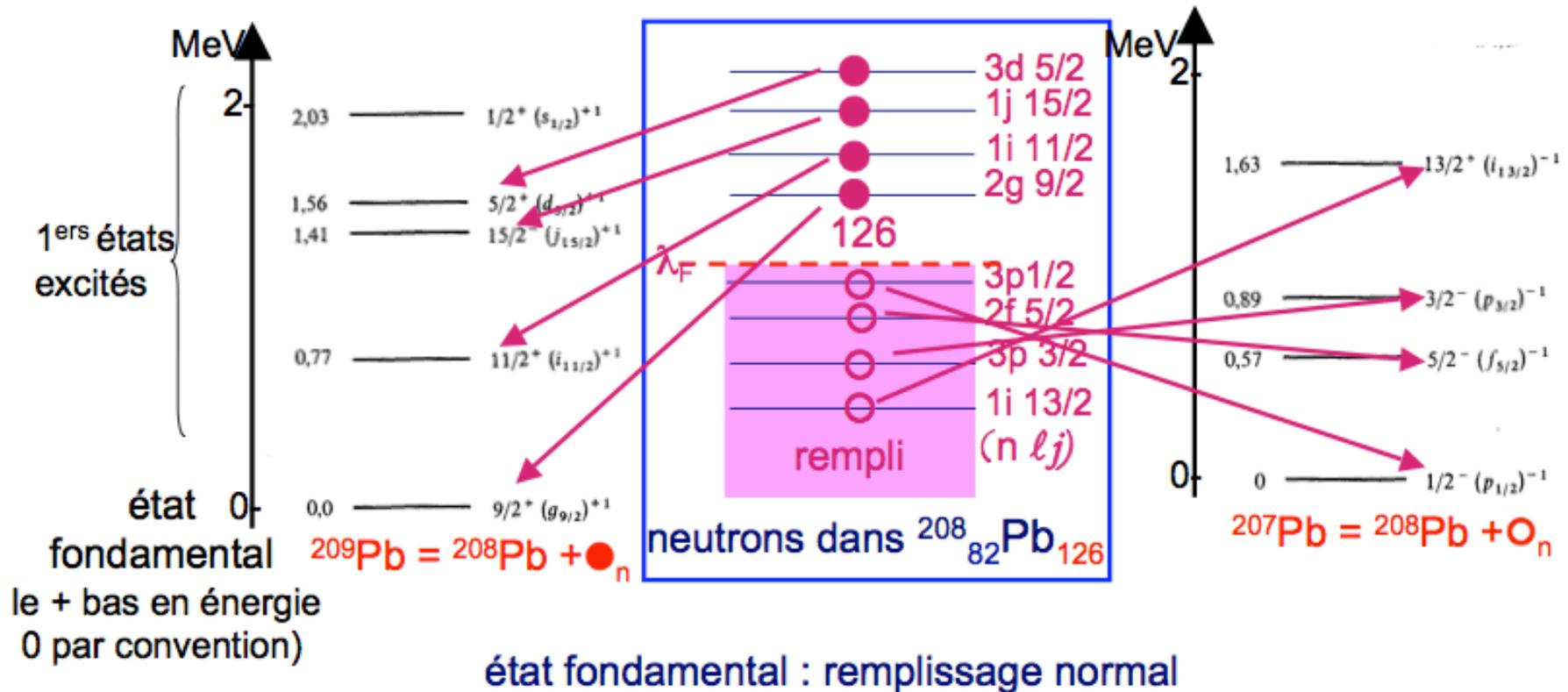


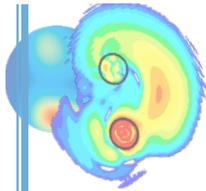
# SCHÉMA DES NOYAUX IMPAIRS

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

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

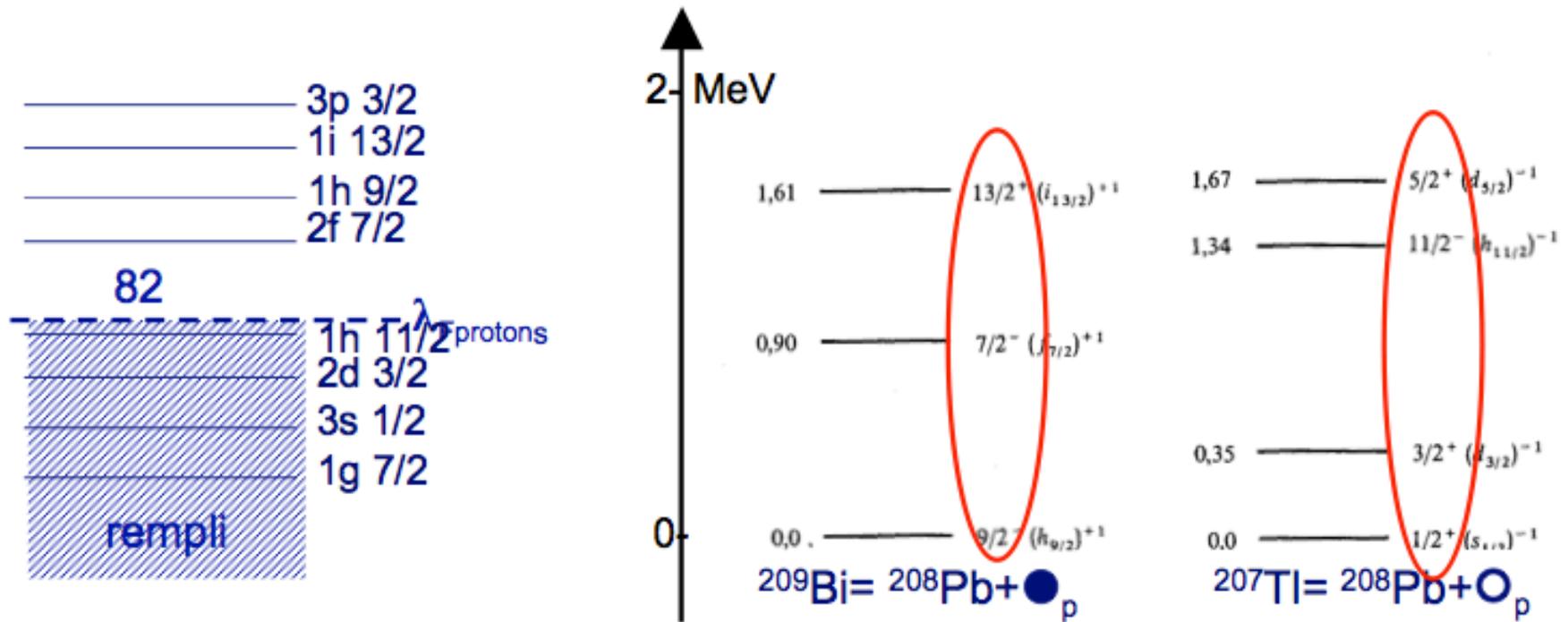
gap empêche d'aller dans les états au-dessus trop cher en énergie



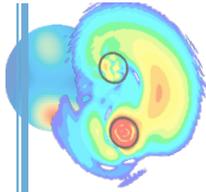


# CA MARCHE DÉJÀ MOINS BIEN EN PROTONS !

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

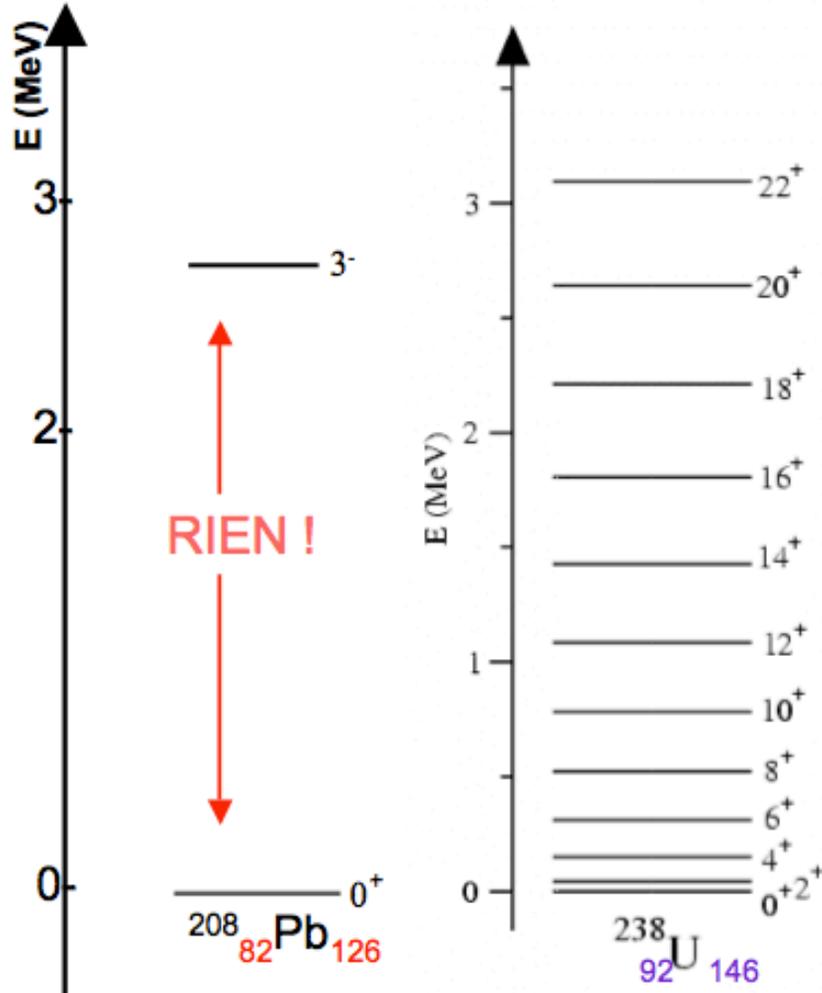


pas le bon ordre !!!!!



# 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<sub>p-p</sub> = Noyau<sub>p-i</sub> + nucléon

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

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

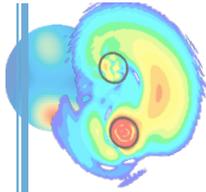
$$\text{si } j_{\text{célibataire}} + j'_{\text{célibataire}} = 0$$

$\Rightarrow$  les nucléons se lient en paires  $\downarrow$

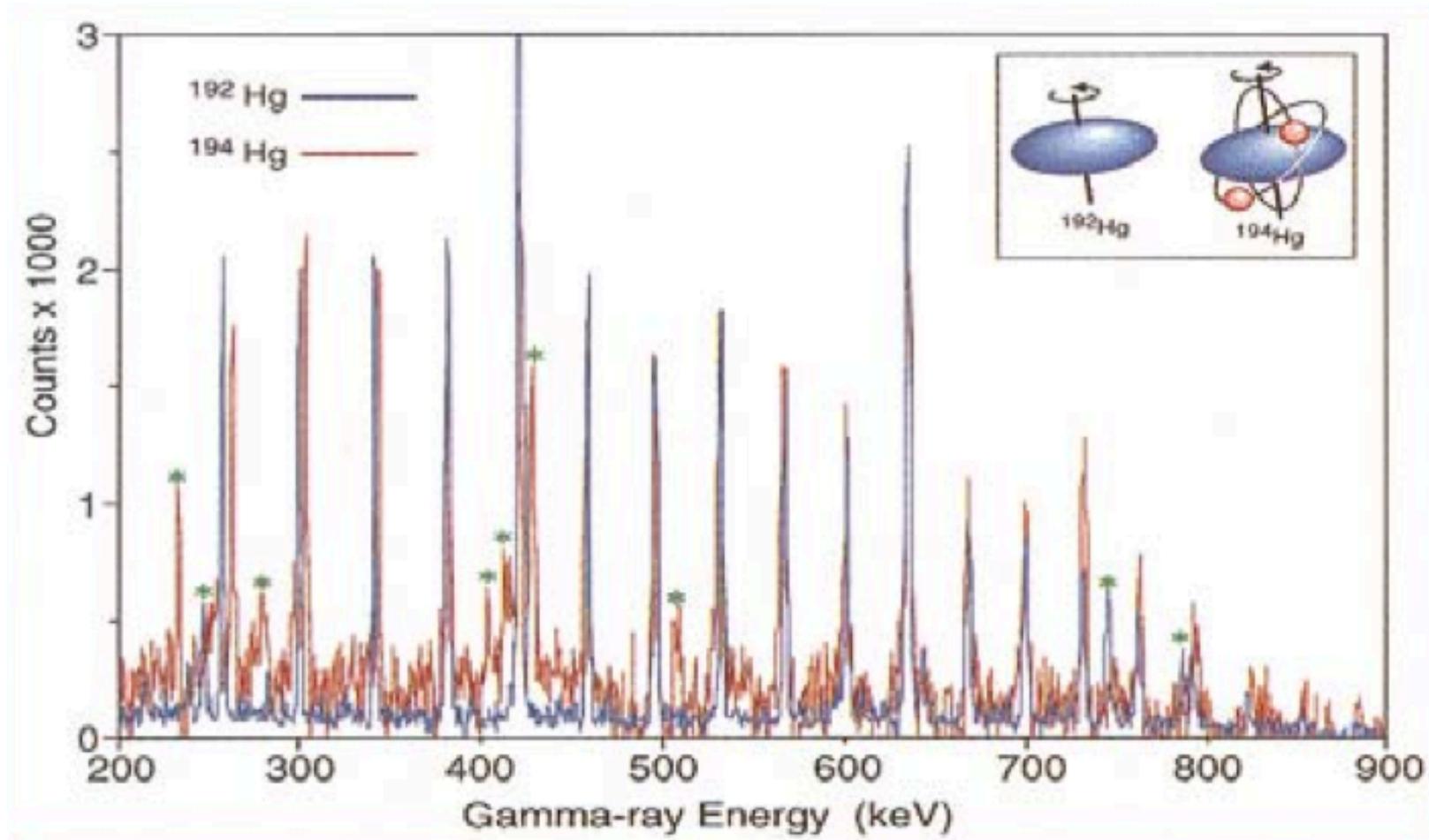
$\Leftrightarrow$  APPARIEMENT (gain de liaison)

**Conséquence :** 1<sup>ères</sup> excitations Noyau pair-pair peuvent ne pas être de type individuel (nucléon).

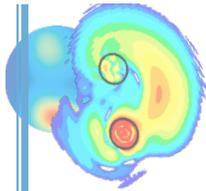
Ex:  $^{238}\text{U}$  schéma de niveaux régulier ni individuel ni osc. harm. (vibration)



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

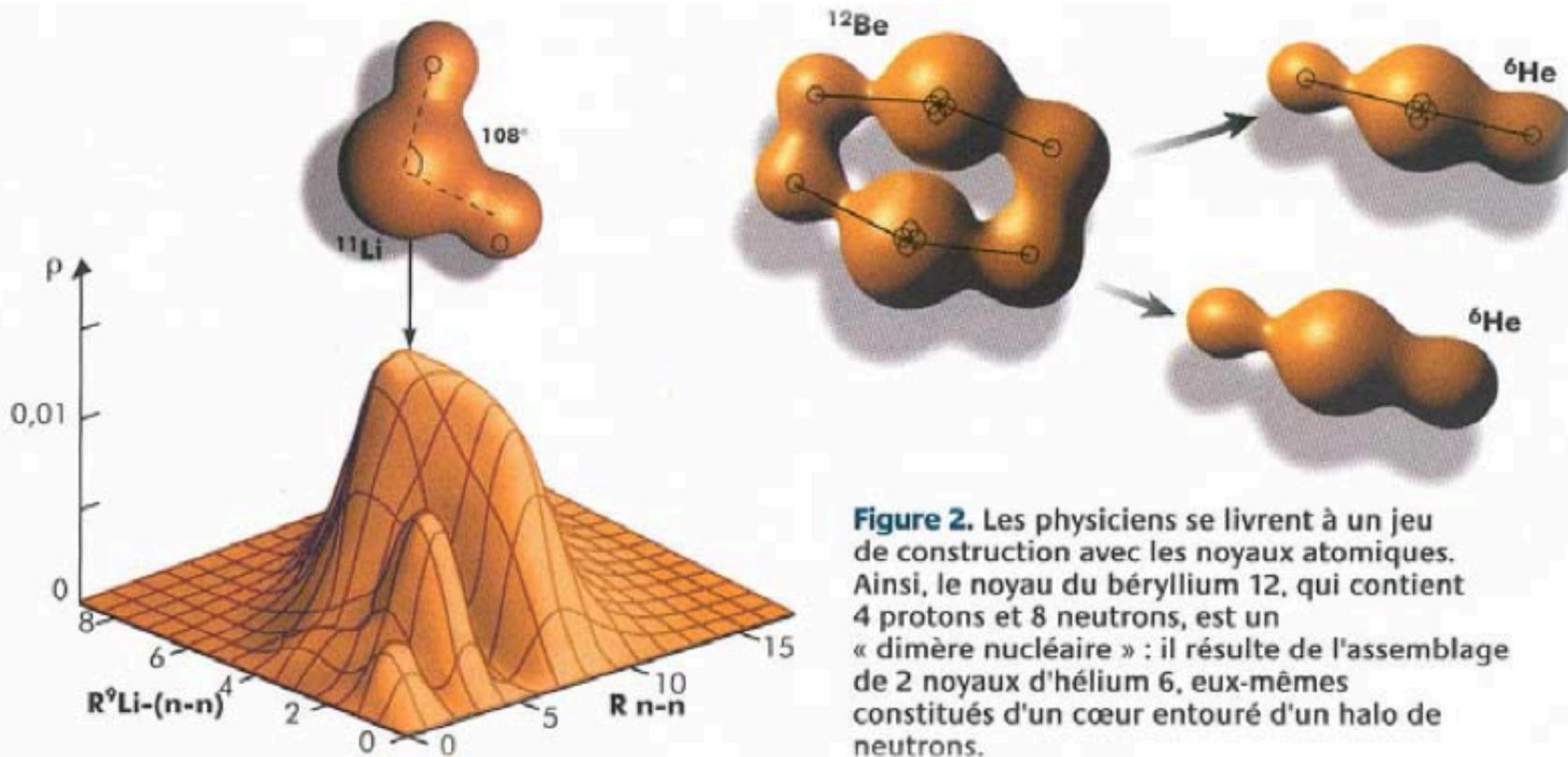


**La signature gamma des noyaux n'est pas unique !!**

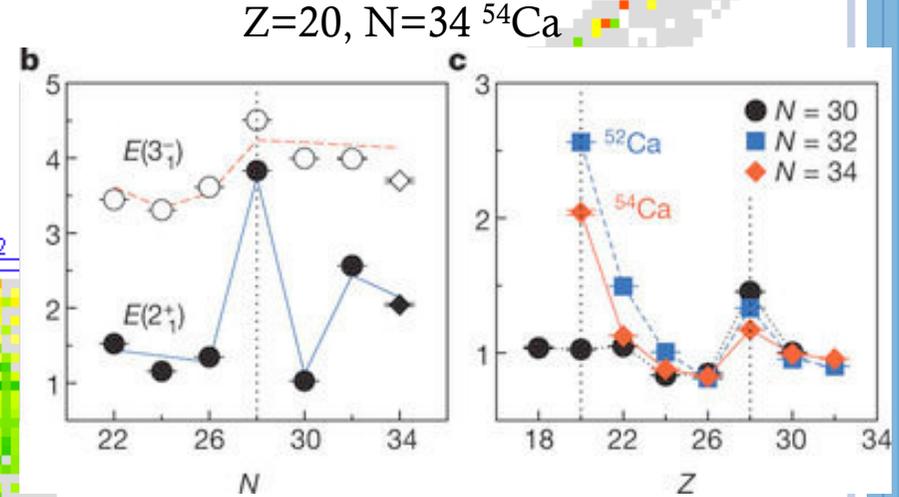
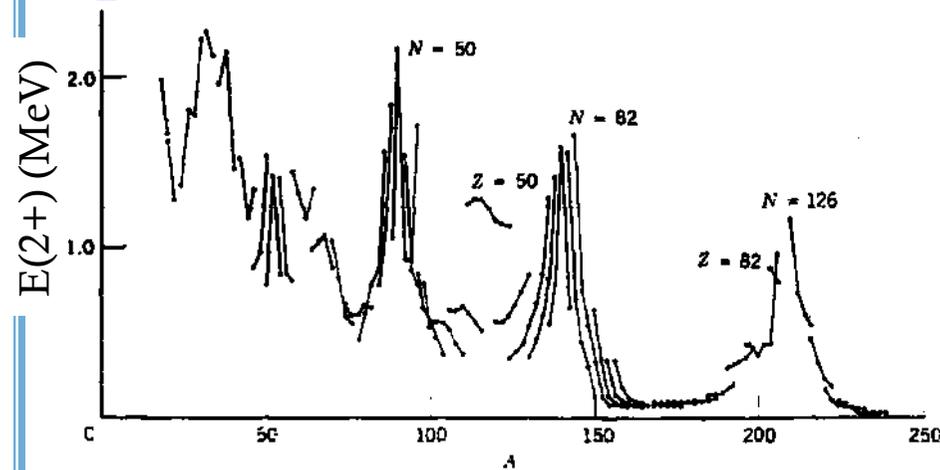


# LES LIMITES DU MODÈLE EN COUCHES : (I) DES « CLUSTERS »\* DANS LES NOYAUX

\* « cluster » = agrégats



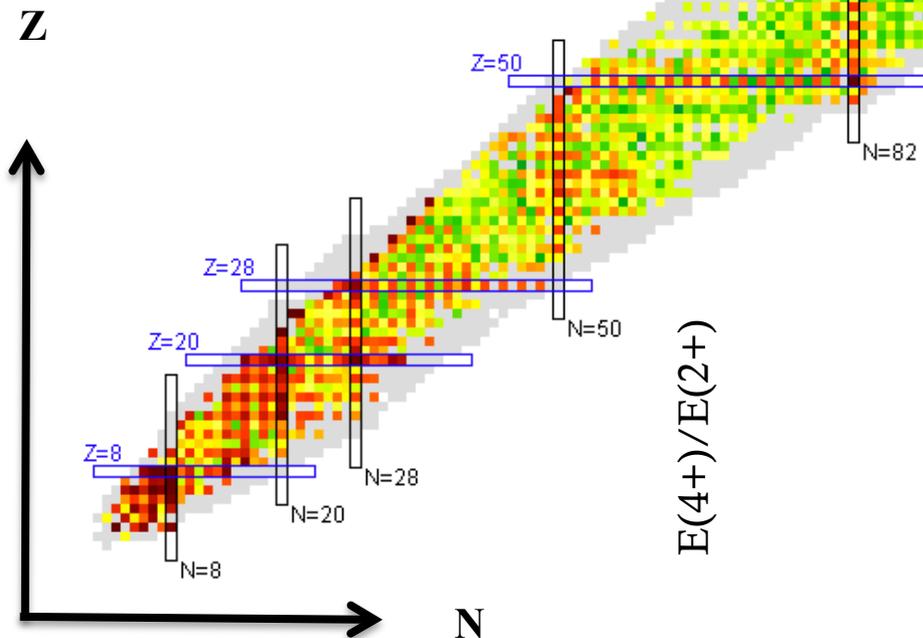
# COMMENT IDENTIFIER UN NOMBRE MAGIQUE ?

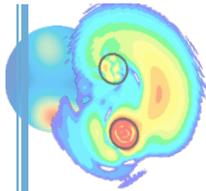


Indication pour un nouveau nombre magique

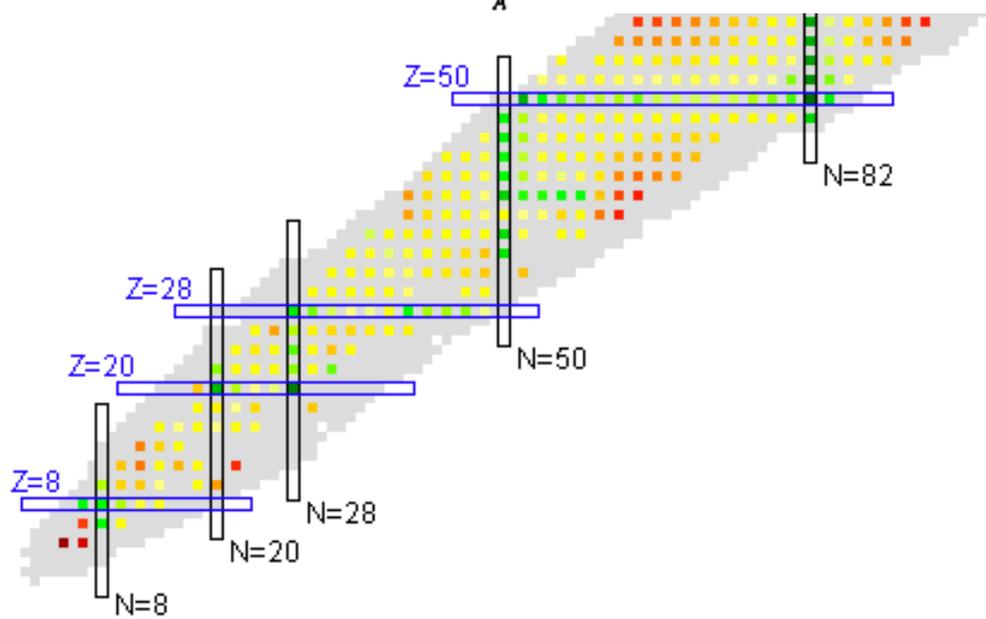
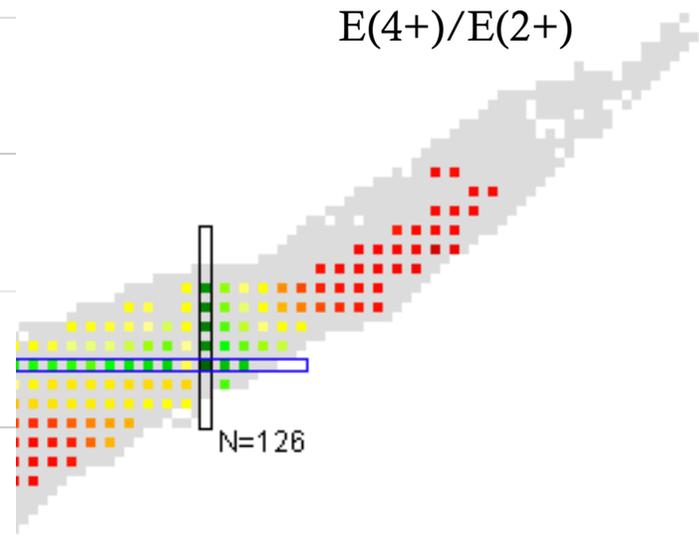
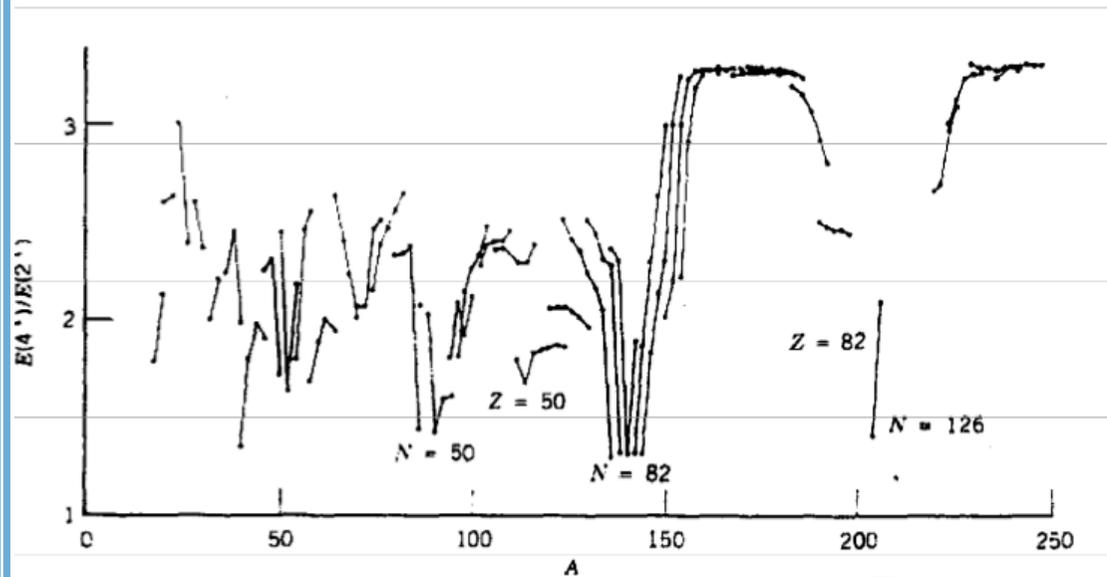
Un faisceau d'indices...

- $E(2^+)$  grande / aux voisins
  - noyau sphérique (peu déformé)
  - $E(4+)/E(2^+) \sim 2$  sphérique  
 $\sim 3.3$  déformé
- type de collectivité --> déformation





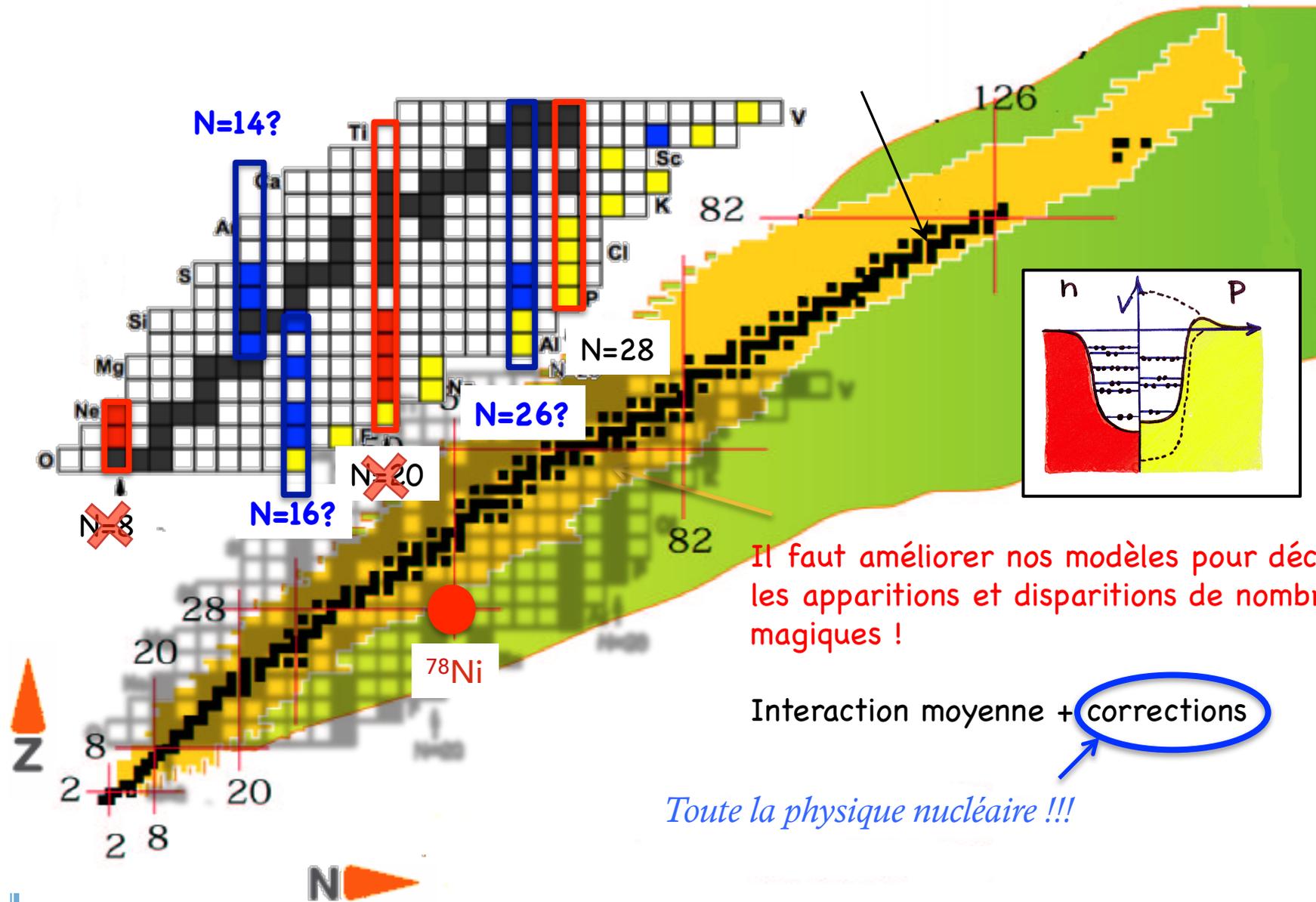
# COMMENT IDENTIFIER UN NOMBRE MAGIQUE ?

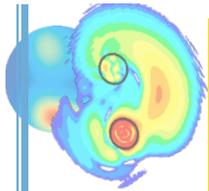


Un faisceau d'indices...

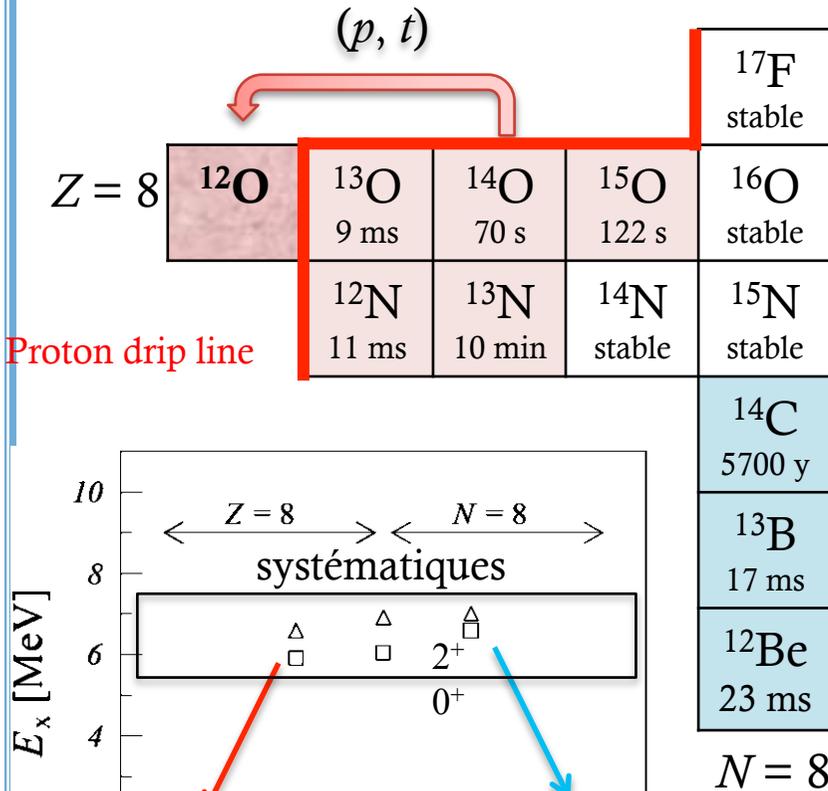
- $E(2+)$  grande / aux voisins
  - noyau sphérique (peu déformé)
  - $E(4+)/E(2+) \sim 2$  sphérique  
 $\sim 3.3$  déformé
- type de collectivité --> déformation

# L'APPARITION ET LA DISPARITION DES NOMBRES MAGIQUES

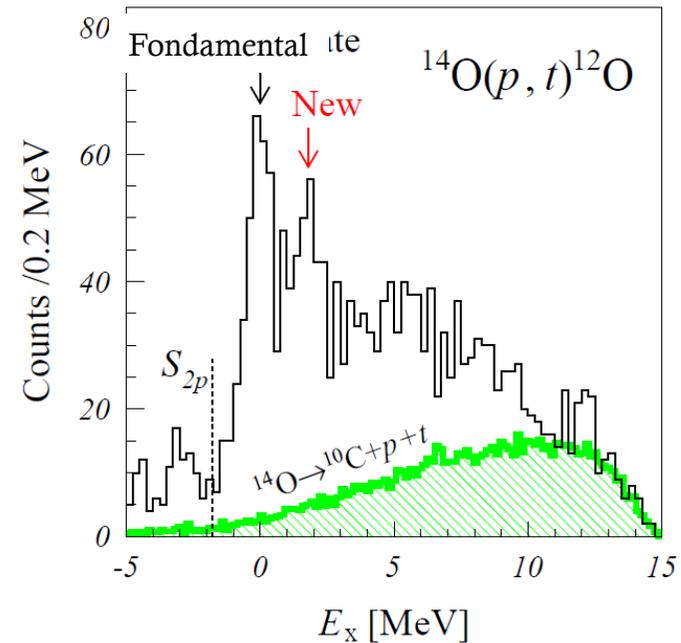
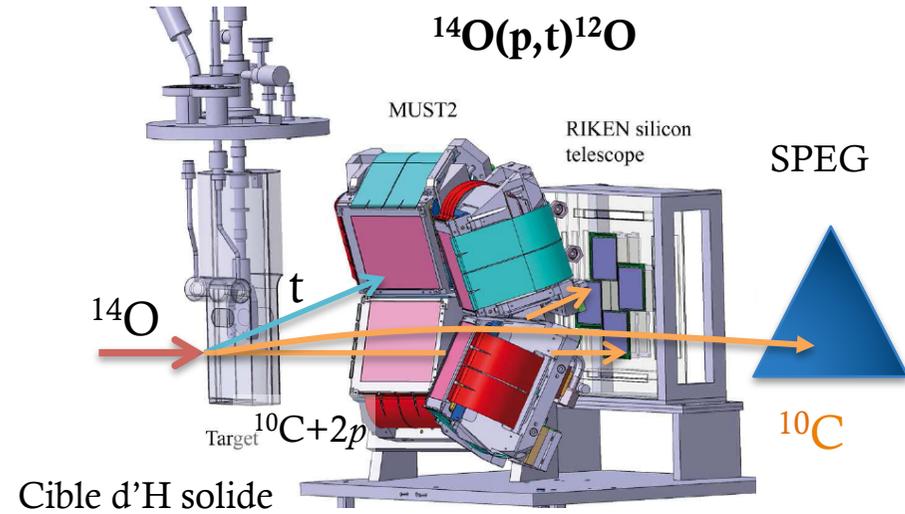


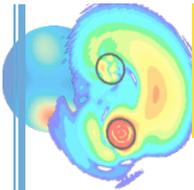


# LE NOYAU NON-LIÉ D' $^{12}\text{O}$ ET LE NOMBRE MAGIQUE $Z = 8$



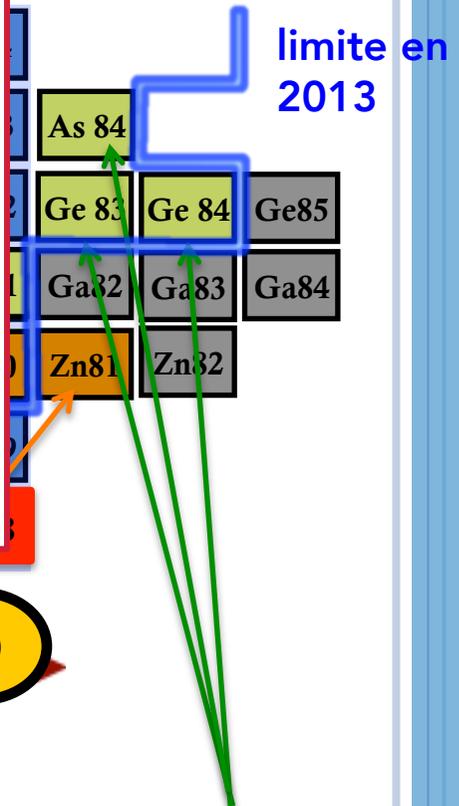
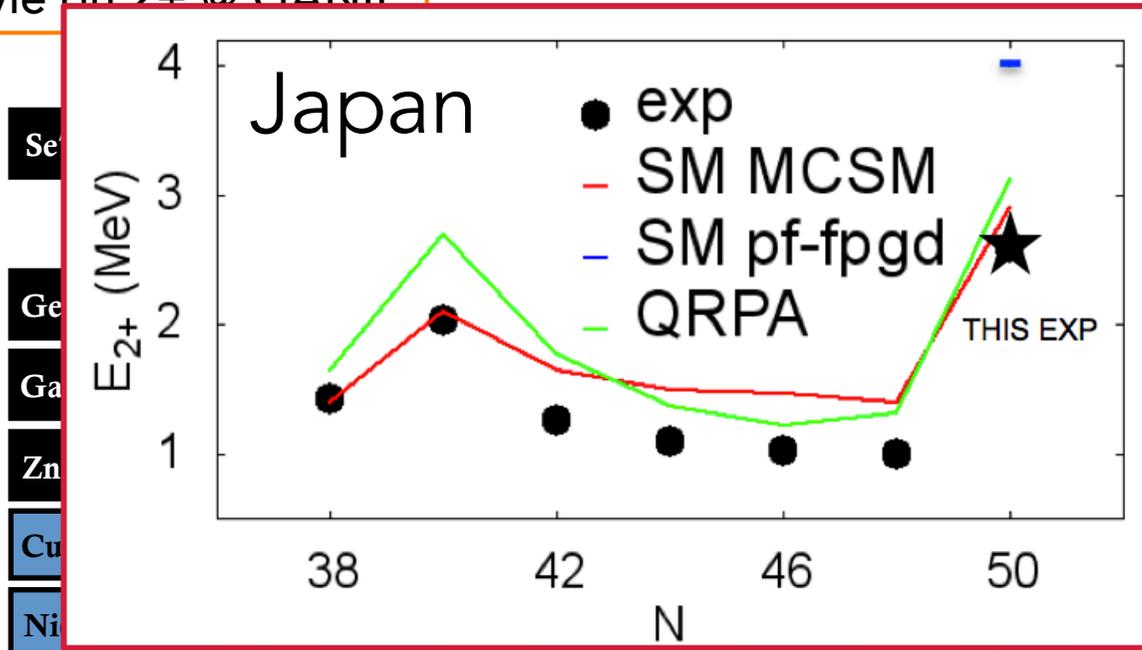
- Découverte d'un nouvel état dans l' $^{12}\text{O}$  (non lié)
- Disparition de la fermeture de couche  $Z = 8$





# EN ROUTE VERS LE $^{78}\text{Ni}$ ...

durée de vie du  $2+$  @ GANIL



28

40

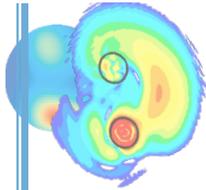
50

$\nu g_{9/2}$

$\beta \gamma$  spectroscopy @ RIKEN

Spectroscopie par réaction @ GANIL

$\gamma$  spectroscopy @ ALTO



# 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) :

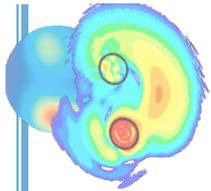
- ▶ Le traitement direct du problème à N corps en interaction
- ▶ théories dépendantes du temps qui permettent d'avoir une vision unifiée de la structure et des réactions
- ▶ ... ?

**Problème  
à N corps**

**Modèle en  
couches**

**Théories  
dépendantes  
du temps**





# LES MODÈLES AUJOURD'HUI

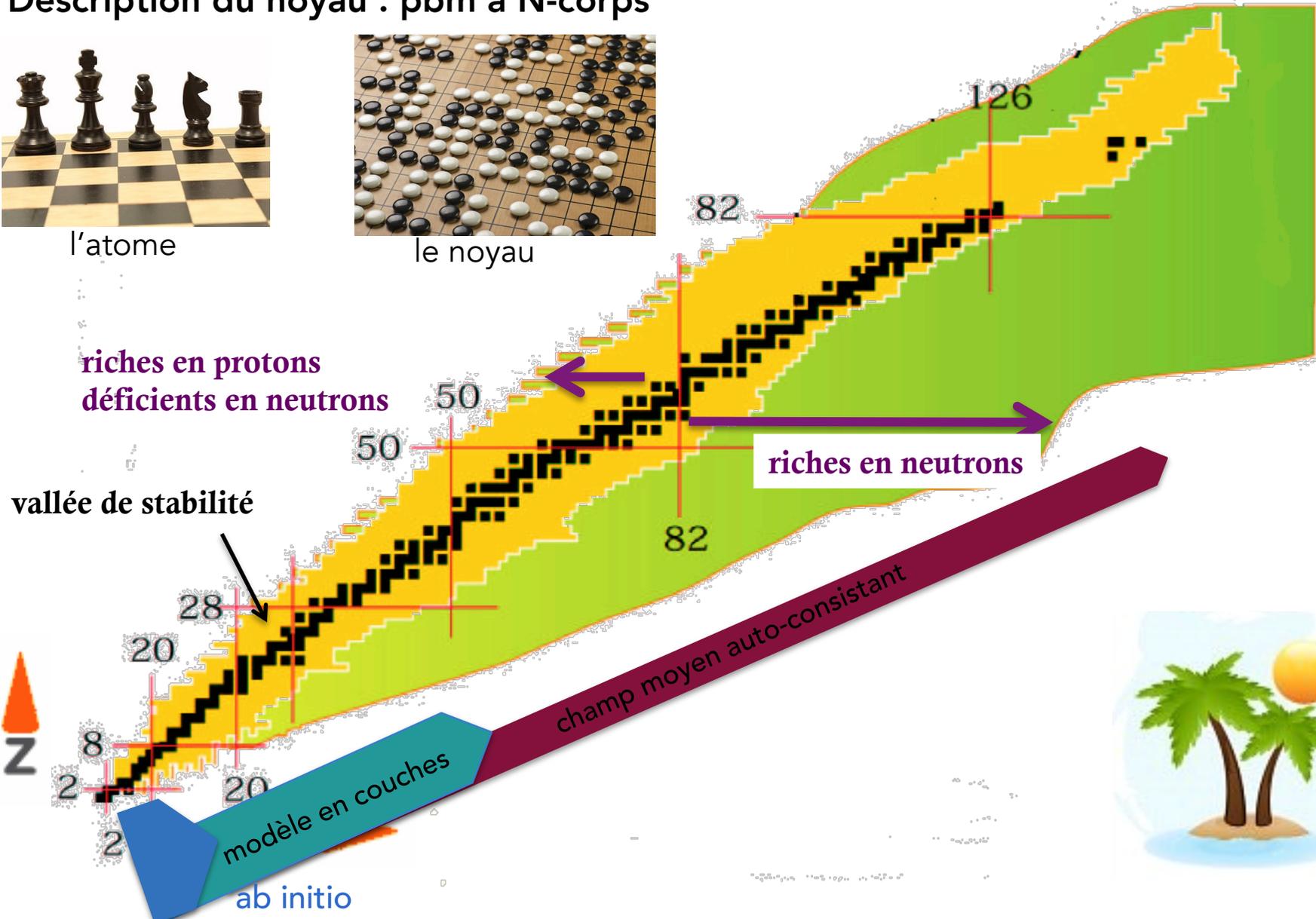
Description du noyau : pbm à N-corps

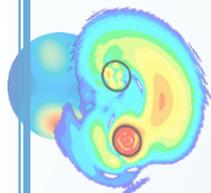


l'atome



le noyau

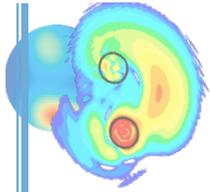




## RÉSUMÉ DE LA DESCRIPTION DU NOYAU

- ▶ **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**



# Comprendre le noyau



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

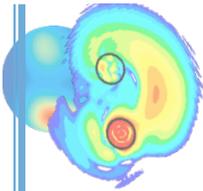
- I. Les échelles de la physique nucléaire et comment voir le noyau ?
- II. La « glue » du noyau et ses conséquences
- III. Ça pèse combien un noyau ? Masse et énergie de liaison
- IV. Les noyaux instables. Combien y en a ? Comment on les fabrique ?

## 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

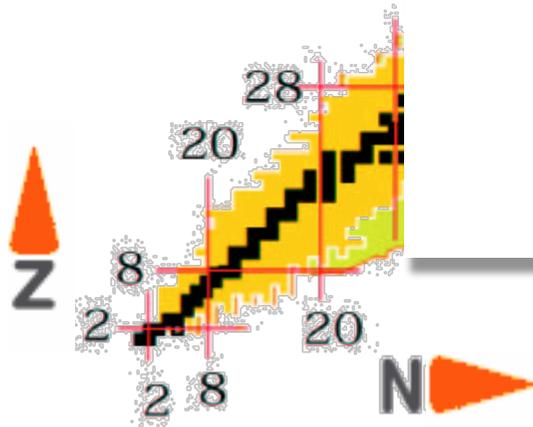
- I. Comment on étudie les noyaux ?
- II. Comment on fabrique les noyaux pour les étudier ?
- III. Les réactions directes
- IV. Bonus : astrophysique nucléaire



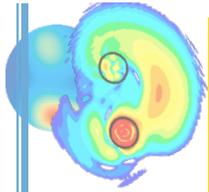
# LA COURSE VERS L'EXOTISME



ric  
dél

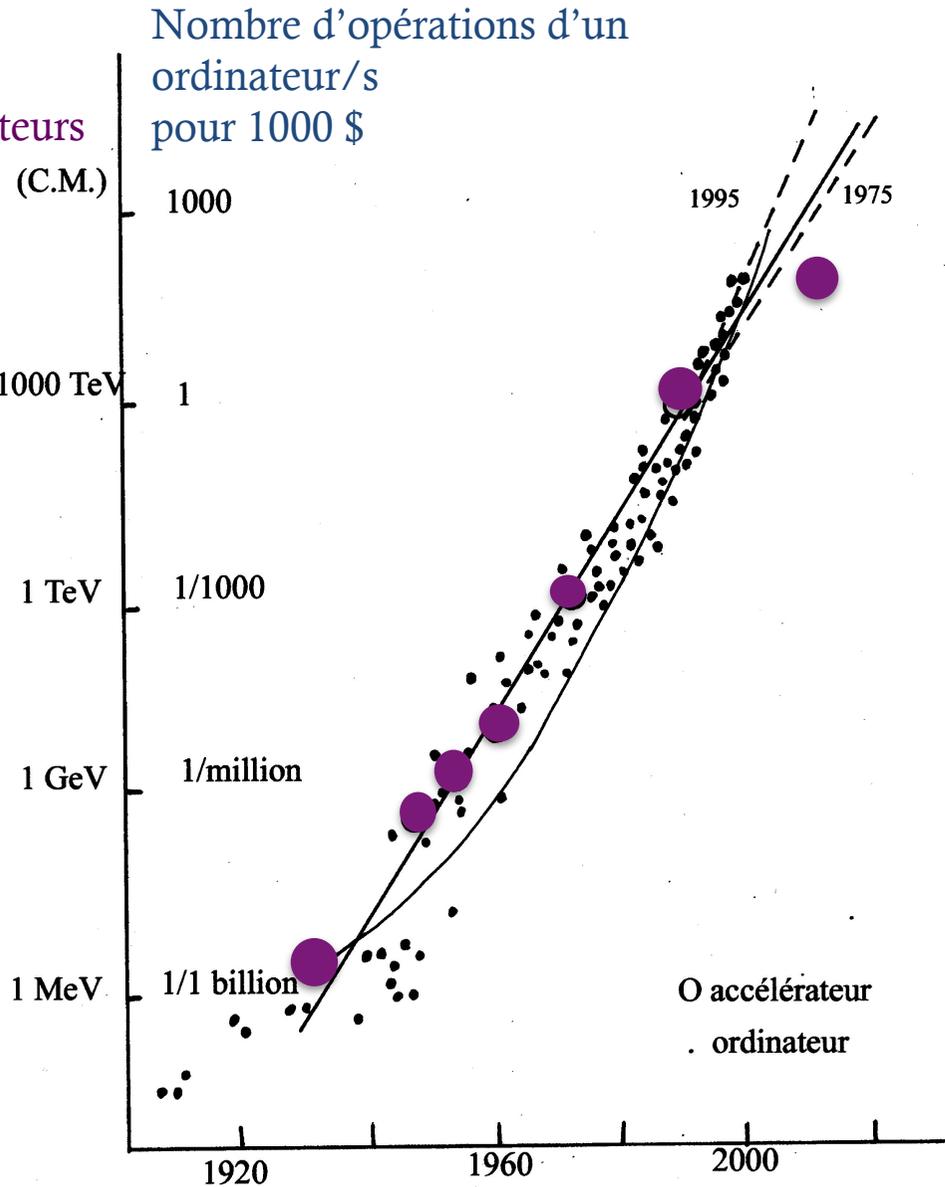


21/12/17



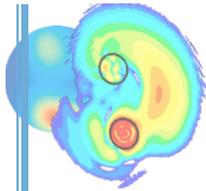
# QUELS PROGRÈS EN PHYSIQUE NUCLÉAIRE POUR DEMAIN ?

Energie  
accélérateurs

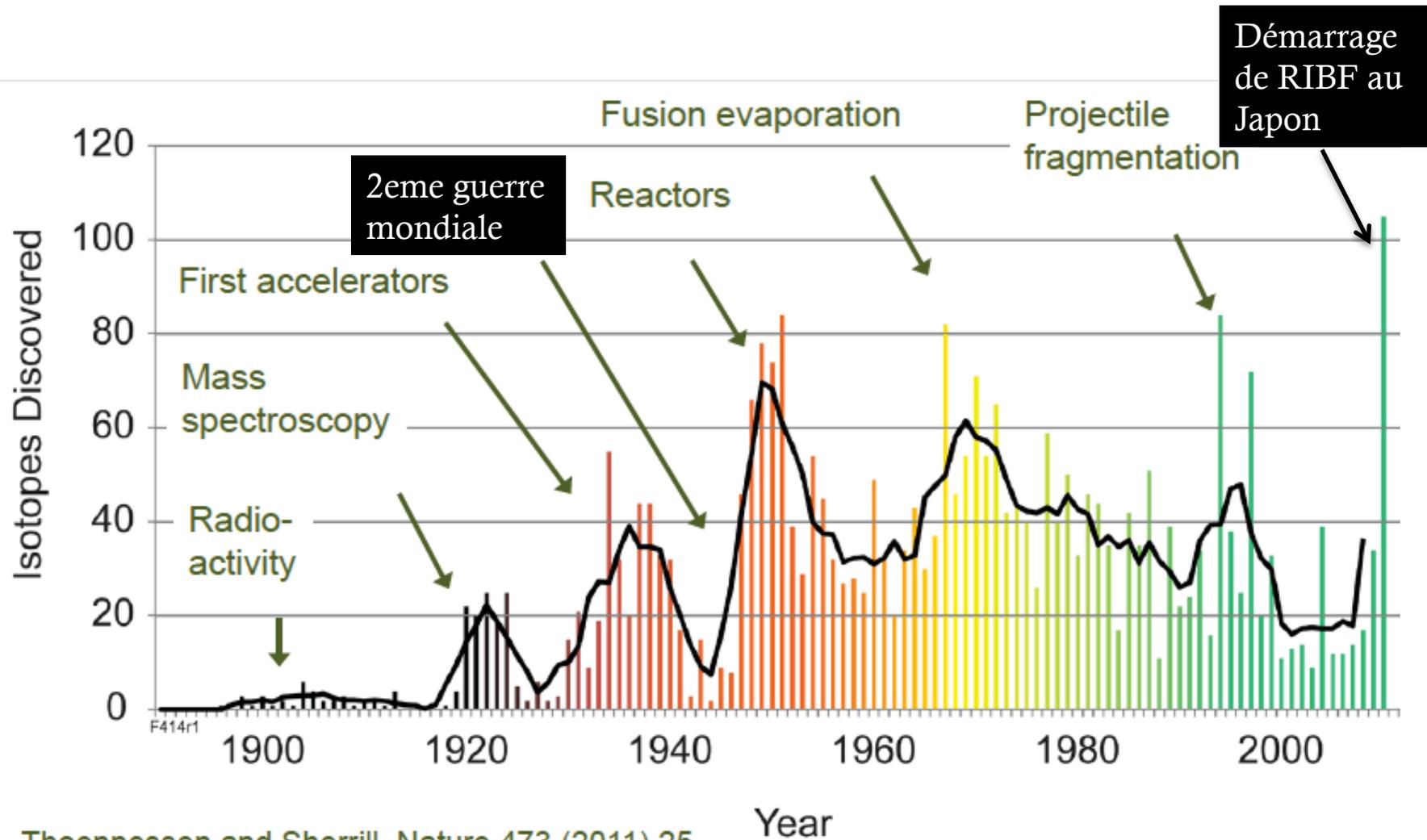


Courbe de Livingstone des  
accélérateurs

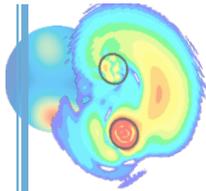
Loi de Moore pour les  
ordinateurs (évolution de la  
puissance des ordinateurs)



# NOMBRE D'ISOTOPES DÉCOUVERTS



→ Il y a une difficulté ...

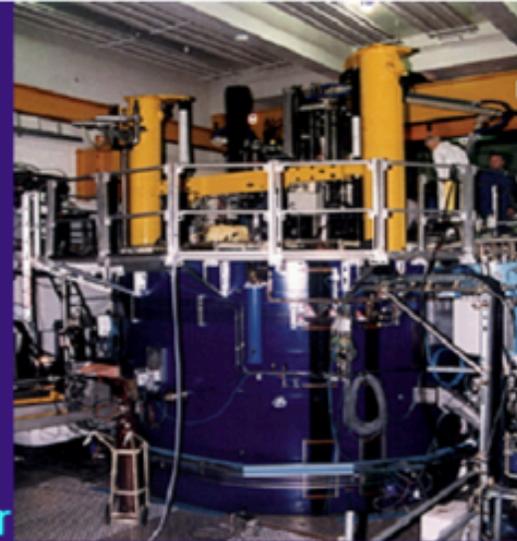
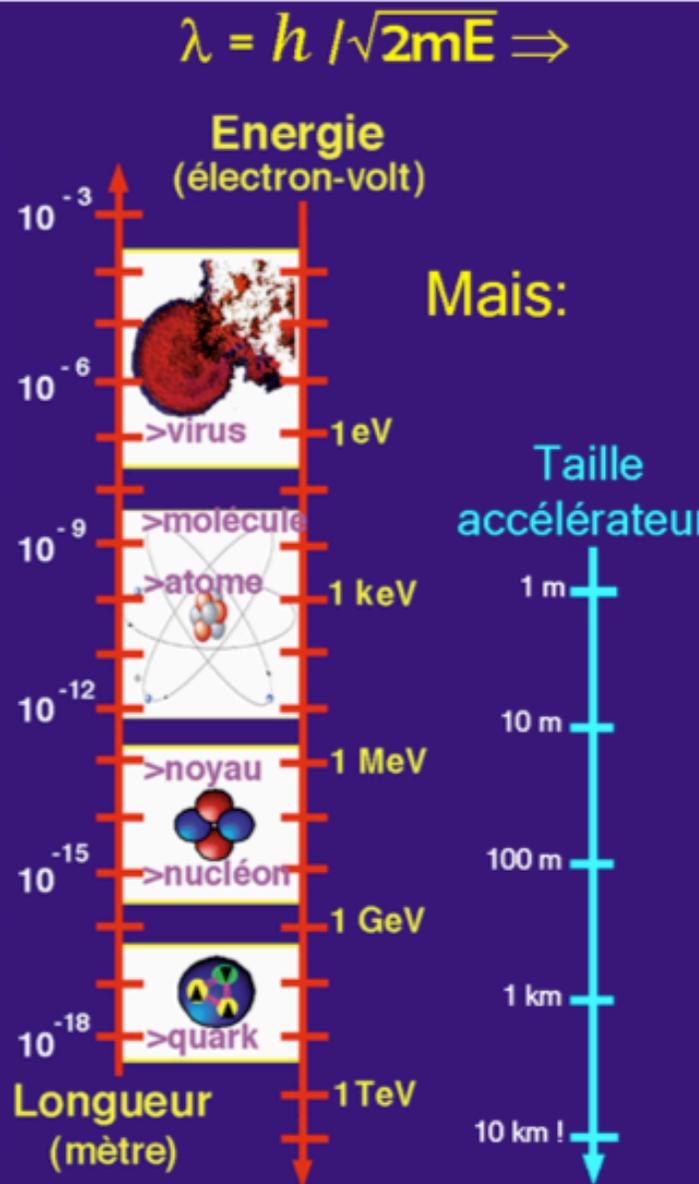


# LA COURSE À L'ÉNERGIE



Microscope électronique

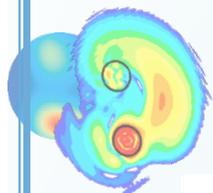
Accélérateur linéaire (SLAC)



Cyclotron (AGOR)

Synchrotron (LHC)





# LA QUÊTE DE L'EXOTISME

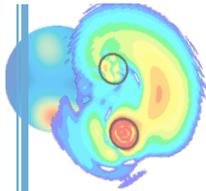
## (I) LES ACCÉLÉRATEURS



- ▶ **Les méthodes de production**
  - mécanismes de réaction
  - méthode en vol
  - méthode de fragmentation



- ▶ **Les installations dans le monde**



# PRODUCTION DE FAISCEAUX RADIOACTIFS

## ► Méthode ISOL

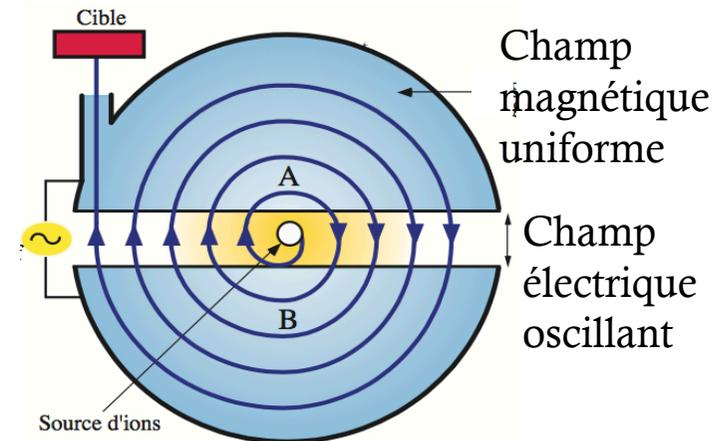
Accélérateur

## ► Méthode de fragmentation

Accélérateur

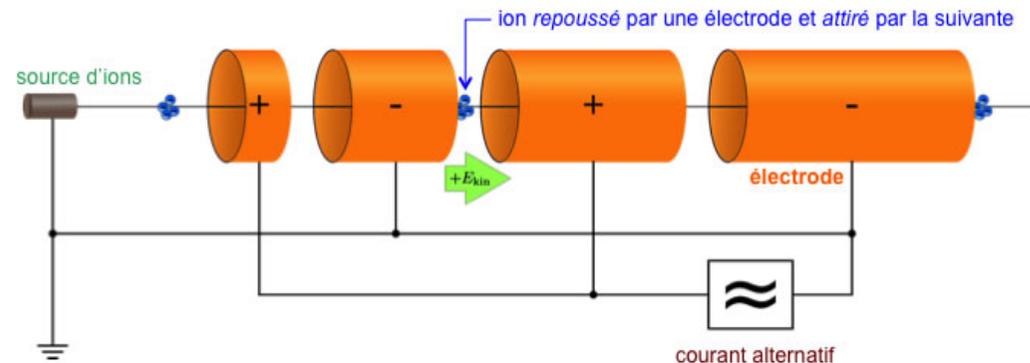
## ► Cyclotron, synchrocyclotron, synchrotron

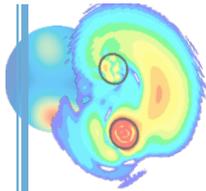
NSCL (E-U), GANIL (France), FAIR (Allemagne)  
TRIUMF (Canada), RIKEN RIBF (Japon)



## ► Linac

FRIB (E-U), ATLAS – ANL (Argonne, E-U),  
ALTO (Orsay), Spiral2 (GANIL, Caen)





# PRODUCTION DE FAISCEAUX RADIOACTIFS

## ► Méthode ISOL

faisceau



cible



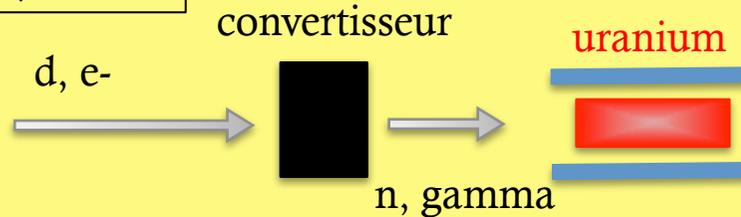
intensité  
qualité optique des faisceaux  
Energie bien définie



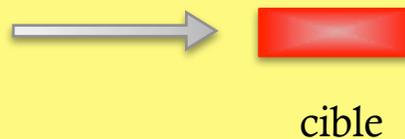
chimie  
temps de vie minimum  
post-accelération

## ► Méthode de fragmentation

Spiral2, ALTO



Spiral1, Spiral 2



Accélérateur

Primary beam

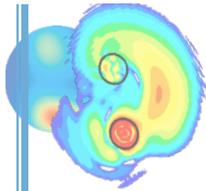
Thick & hot target

Ion source

Isotope separator

(Post-accelerator)

Radioactive  
ion beam



# PRODUCTION DE FAISCEAUX RADIOACTIFS

## ► Méthode ISOL

faisceau



cible

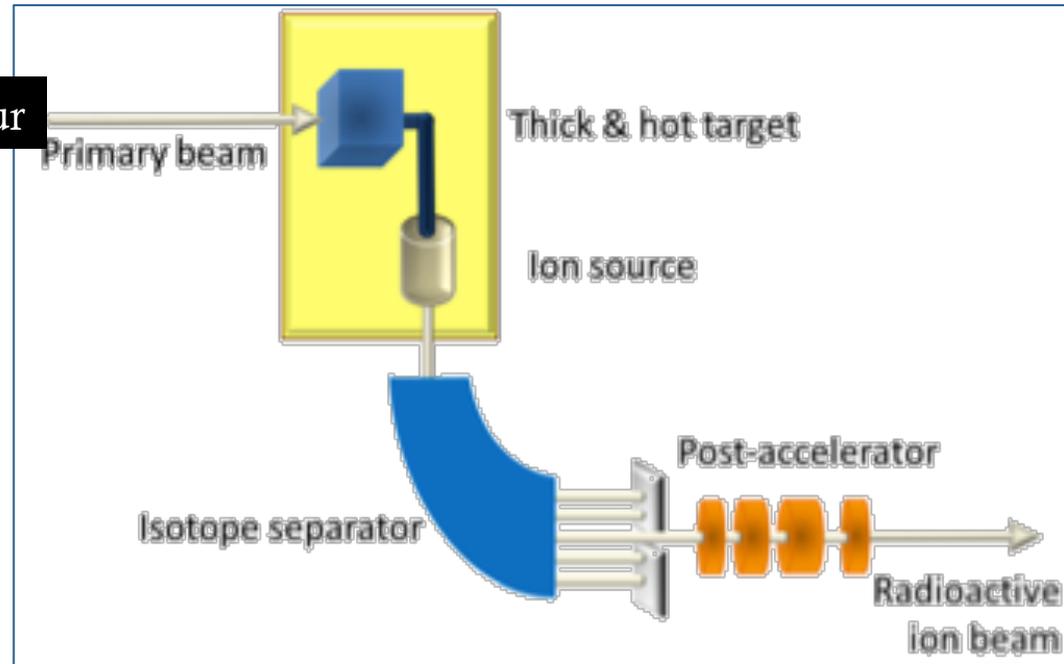
Accélérateur



intensité  
qualité optique des faisceaux  
Energie bien définie



chimie  
temps de vie minimum  
post-accelération



## ► Méthode de fragmentation

faisceau



cible

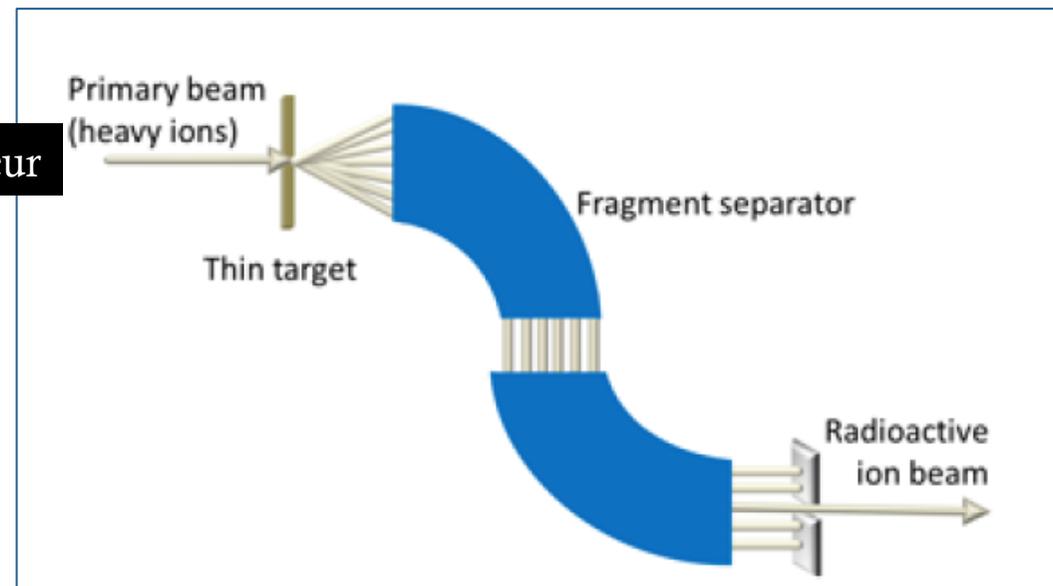
Accélérateur

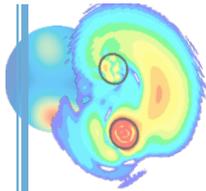


énergie  $\approx$  faisceau primaire  
rapide, pas de chimie  
cible production simple



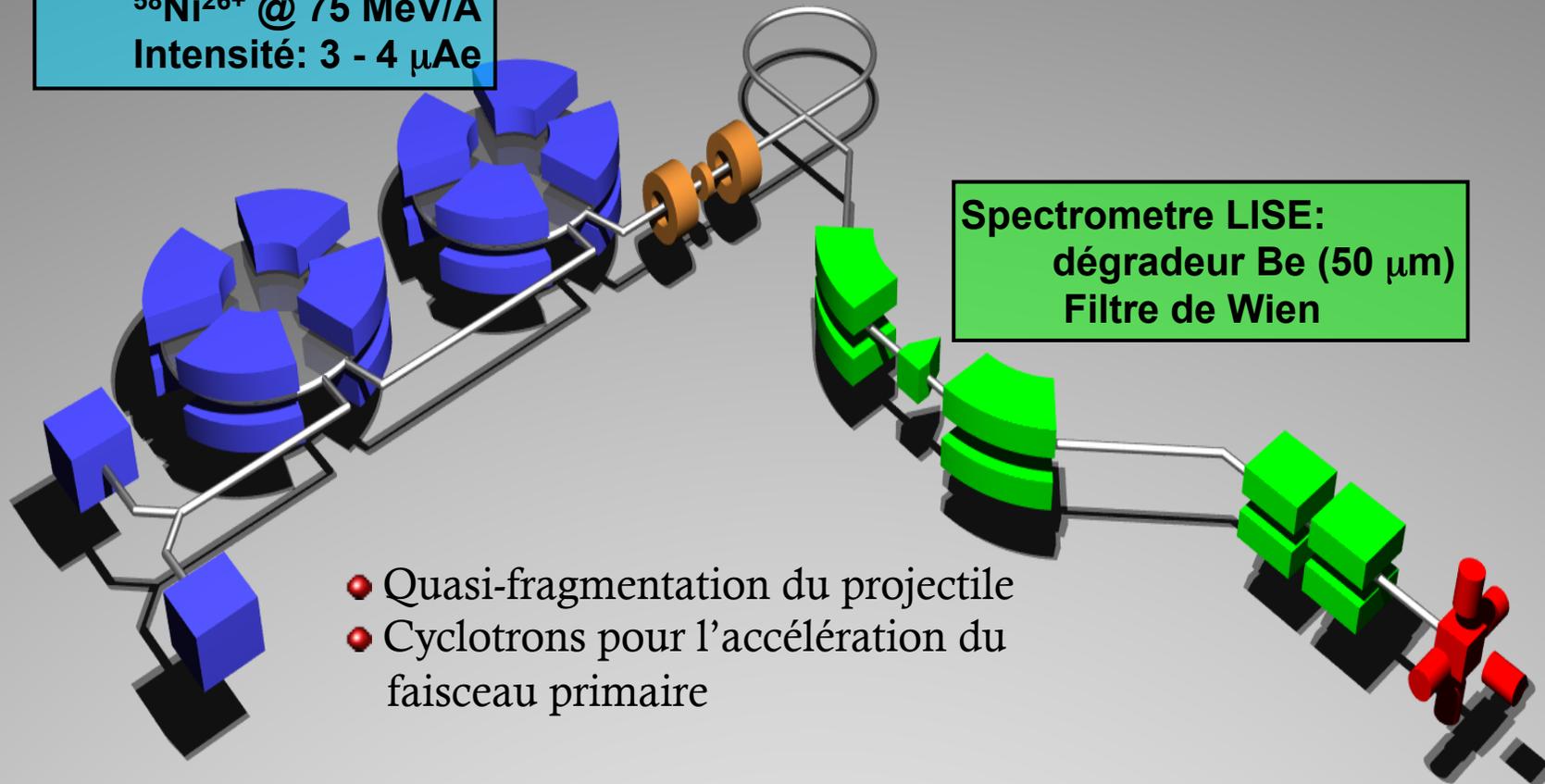
ralentir les faisceaux  
sélectionner les noyaux





## EXEMPLE DU GANIL (FRAGMENTATION EN VOL)

Faisceau primaire  
 $^{58}\text{Ni}^{26+}$  @ 75 MeV/A  
Intensité: 3 - 4  $\mu\text{Ae}$

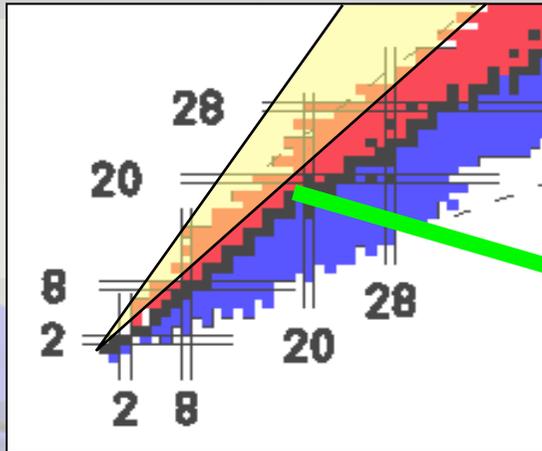


Spectrometre LISE:  
dégradeur Be (50  $\mu\text{m}$ )  
Filtre de Wien

Système de détection

# LE SPECTROMÈTRE LISE ET LA SÉLECTION DES NOYAUX

**1<sup>er</sup> dipole:**  
rigidité magnétique  
 $B\rho = A \cdot v / Z$

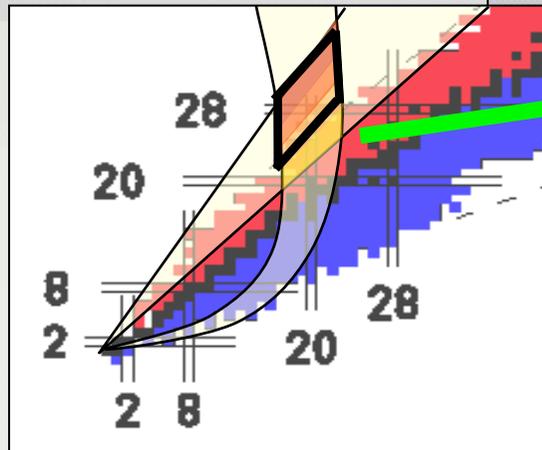
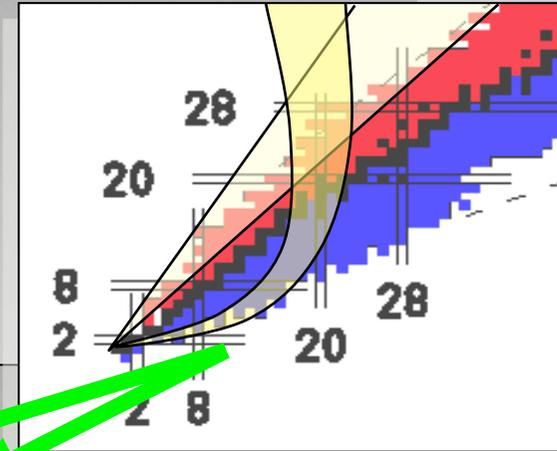


$$\Delta E \propto \frac{Z^2}{v^2}$$

$$v \propto \frac{Z}{A}$$

$$\frac{\Delta E}{E} \propto \frac{A^3}{Z^2}$$

**Degrader+ 2<sup>nd</sup> dipole:**  
 $A^3 / Z^2$  selection



**Wien Filter:**  
sélection de vitesse

