

# Physique Nucléaire : quelques enjeux et thématiques

Isabelle Deloncle, CSNSM

Ecole de la physique au détecteur  
Fréjus Novembre 2008

# Plan des cours:

## I Approche “Théorique” de la physique nucléaire

Un noyau : du classique au quantique du macroscopique au microscopique  
du collectif et de l'individuel

Premier chapitre :

Aspects classiques

Deuxième chapitre :

Aspects quantiques

## II Approche expérimentale des noyaux loin de la stabilité

Troisième chapitre :

Expériences : créer des noyaux loin des zones normalement  
peuplées

Quatrième chapitre :

Synthèse des noyaux exotiques: installations et détecteurs “IN2P3”

Dernier chapitre :

Un exemple de mesure: mesures de masse

Si vous voulez lire sur ces sujets :

Physique subatomique : Noyaux et Particules de L. Valentin

Mécanique Quantique I et II Cohen-Tannoudji, Diu, Laloë

Wikipédia en long en large et en travers

# Ordres de grandeur

taille atome en Å :  $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$

masse électron  $9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$

rayon 'classique' électron  $\sim 2,8 \text{ fm}$

énergie au repos  $\sim 0,5 \text{ MeV}$  ( $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ ,  $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$ )

taille noyau en fm :

ordre de grandeur noyau atomique Fermi :  $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$

masse d'un proton  $1,673 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ , (neutron  $1,675 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ )  $= 10^3$  masse  $e^-$

$\Rightarrow$  masse atome  $\sim$  masse noyau

énergie au repos nucléon  $\sim 1 \text{ GeV} = 10^3 \text{ MeV} = 10^9 \text{ eV}$

énergie au repos noyau  $\sim 100 \text{ GeV}$

densité nucléaire  $\sim 10^{38} \text{ nucléons/cm}^3 \sim 0,1 \text{ nucl/fm}^3$

rayon nucléon  $r_0 \sim 1.1 \text{ fm}$

vitesse nucléon/c  $\sim 21 \%$

$q_{\text{proton}} = +|e|$ ,  $q_{\text{neutron}} = 0$

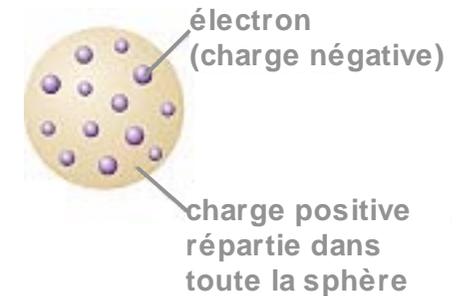
$T_{1/2}(\text{proton})$  stable  $> 10^{30}$  ans,  $T_{1/2}(\text{neutron}) \sim 15 \text{ min}$

Chap 1      Un noyau:  
du classique au quantique  
du macroscopique au microscopique  
du collectif et de l'individuel  
aspect classique

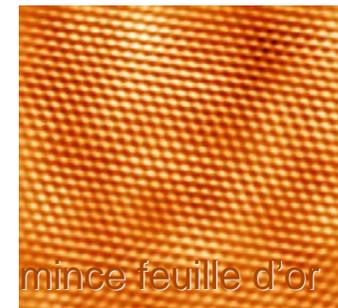
# modèle => expérience

En 1911 l'équipe de Lord Rutherford va réaliser la 1<sup>ère</sup> expérience de physique nucléaire pour tester le modèle pour l'atome de l'époque dit « plum-pudding »

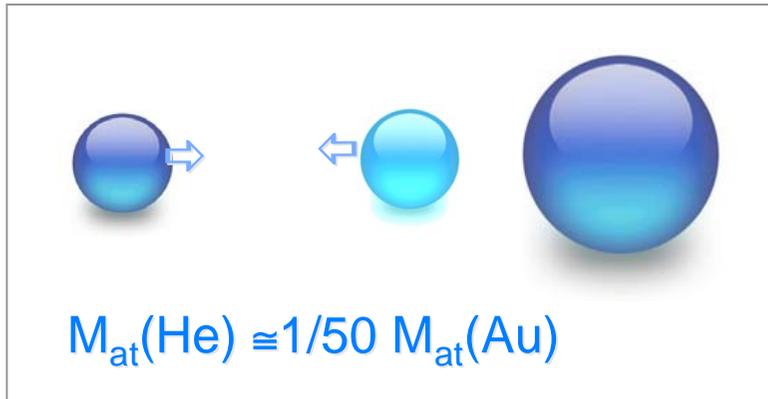
Le modèle précédent était celui la boule de billard, version de Dalton (1803) du concept antique de l'in sécable: a - tomos



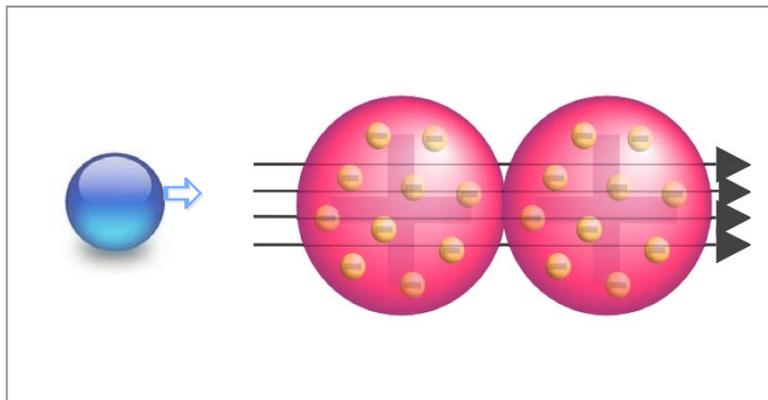
Pour faire l'expérience ils disposent de :  
**projectiles** légers et chargés : particules  $\alpha$   
émises par sources radioactives (Ra, Po), il a  
montré que  $\alpha + 2$  électrons = atome d'He (1908)  
**1 cible** d'atomes lourds neutres : une mince  
feuille d'**Or** ( $6\mu$ , ~200 couches d'atomes)



# Résultats attendus



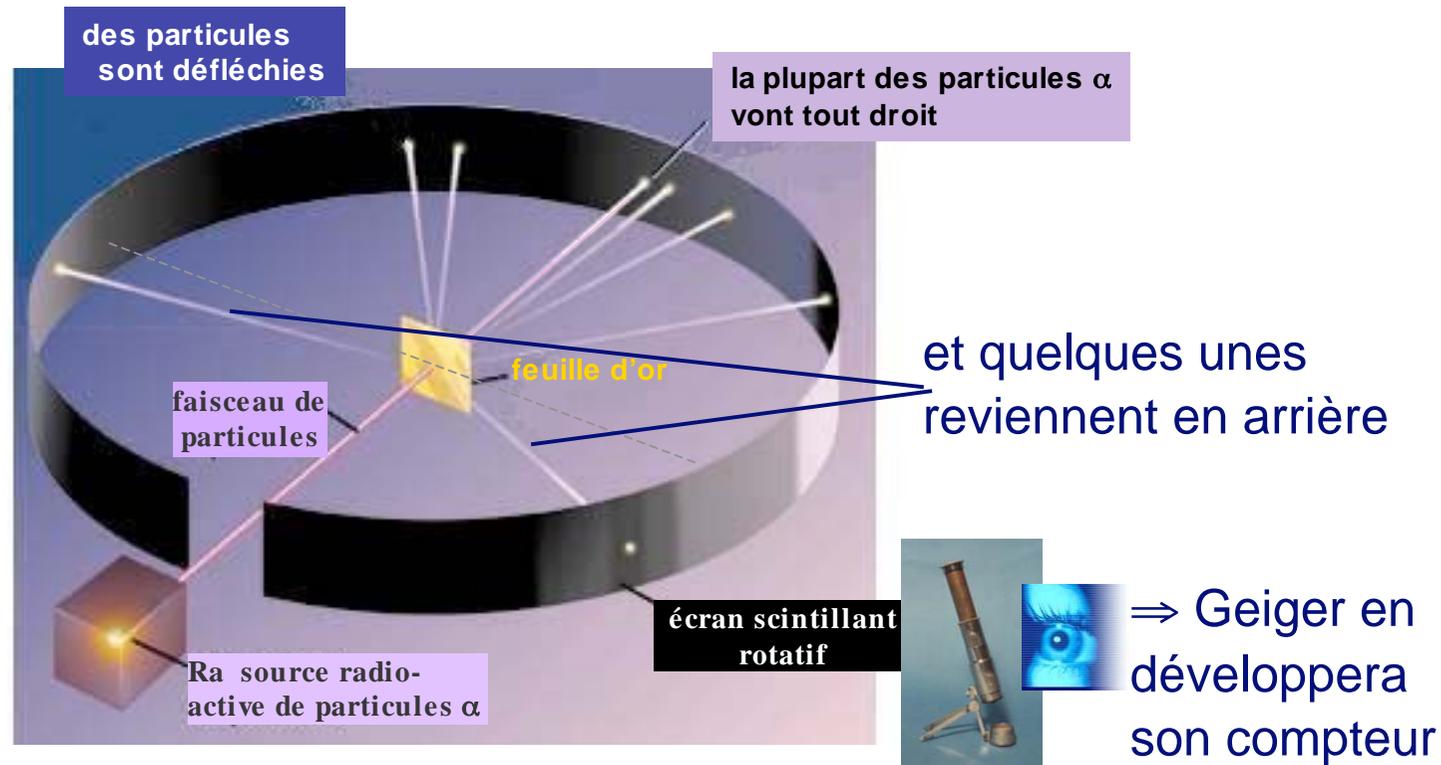
**hyp 1: atome ≡ sphère dure neutre**  
 $N_{T1}$  alphas Traversent **entre** atomes  
 $N_{D1}$  alphas sont **rétro-Diffusés** (sur atomes)  
 $N_{D1} (N_{T1}) \propto$  probabilité rencontrer (ou pas) 1 atome  
 $\propto$  taille atome (ou sa section  $\perp \equiv$  section efficace  $\sigma$ )



**hyp 2: atome ≡ sphère molle (gelée)**  
 $N_{T2}$  alpha traversent **dans et entre** atomes  
 $N_{D2}$  sont **légèrement** (aucune rétro-) diffusées  
 par  $\vec{E}$  électrons, (charge+ étant diffuse)  
 $N_{D2}(N_{T2}) \propto$  probabilité interagir avec 1 électron  
 $\Rightarrow$  section efficace  $\propto Z \times$  dimensions électron  
 $\Rightarrow N_{D2} (N_{T2}) \ll N_{D1} (N_{T1}) \propto$  dimensions atome

**$\Rightarrow$  distinction possible : nombres  $N_T$ ,  $N_D$  et angle des  $N_D$**

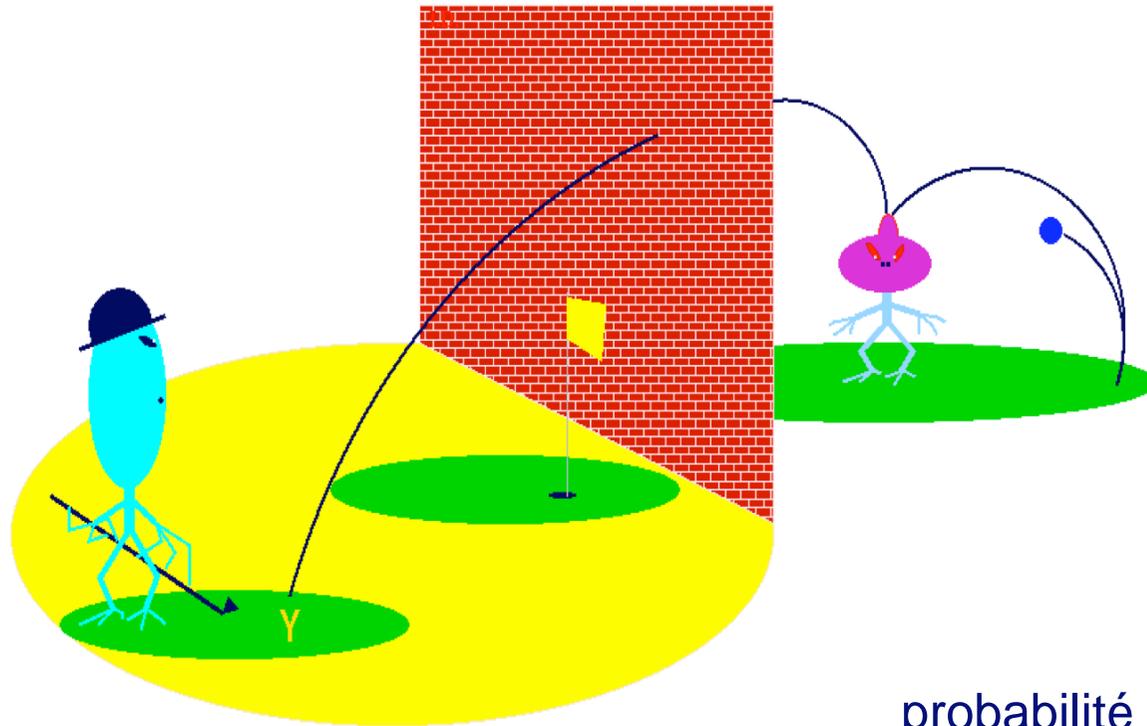
# expérience



⇒ ne correspond à aucun des 2 modèles:

Il y a des particules rétro-diffusées **ET** certaines légèrement déviées  
nombre particules passant tout droit > ceux prévus par modèles 1 et 2

# expérience $\Rightarrow$ modèle



$\Rightarrow$  la matière est essentiellement VIDE !  
structure lacunaire

$\Rightarrow$  il y a un très petit objet au centre de l'atome, très dense et chargé positivement : le NOYAU.

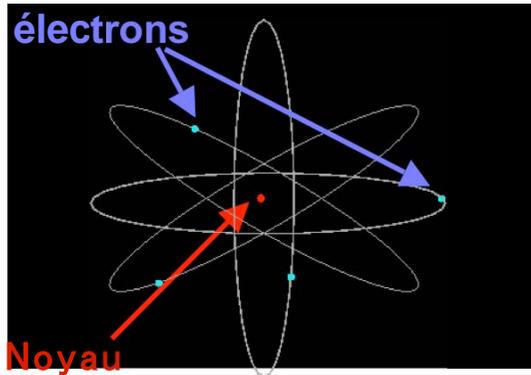
probabilité des rencontres  $\alpha$ -noyau  
de l'ordre de  $\sim 10^{-28} \text{ m}^2$  (barn b)  
 $\Rightarrow$  rayon noyau  $\sim 10$  fermi ( $10^{-14}\text{m}$ )

$\Rightarrow$  nouveau modèle (classique, 1911)

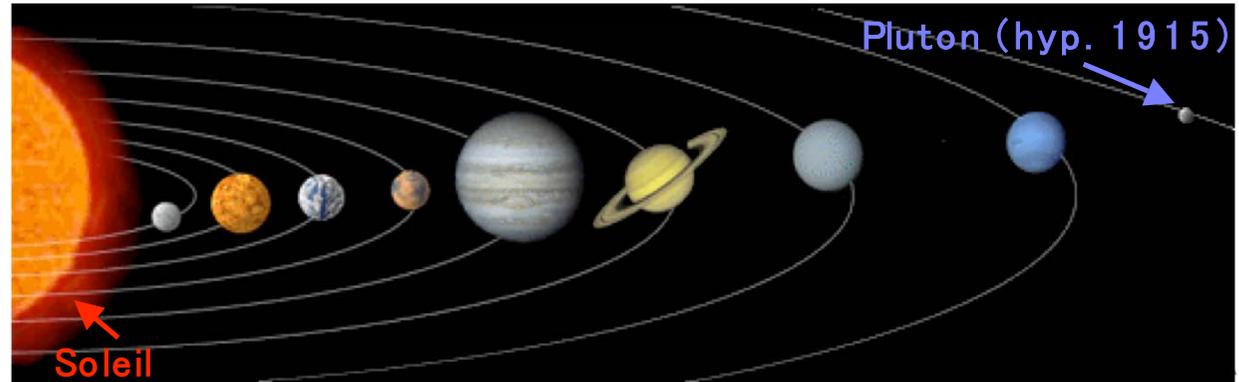
modèle planétaire : l'atome  $\cong$  le système solaire

1 objet central foyer des orbites des objets mobiles

# modèle classique



=



**Mais en infiniment plus petit :**

Distance Soleil –Pluton:  $D_{\odot-P} = 6$  Milliards Kms

Distance Noyau–électron:  $D_{N-e^-} = 1 / 10$  Milliardième m ( $1\text{\AA} = 10^{-10}\text{m}$ )

**et tout aussi (voire plus) “central” :**

Le soleil contient plus de 99% de la matière du système solaire

Le noyau contient plus de 99% de la matière de l'atome

$$R_N = 10^{-15} \text{ m } (10^{-5} \text{ \AA})$$

$$R_{\odot} / D_{\odot-P} = 10 \times R_N / D_{N-e^-} \quad (15 \text{ si Neptune au lieu de Pluton})$$

$$\text{densité noyau} = 1.7 \cdot 10^8 \text{ tonnes/cm}^3 \gg \text{densité moyenne Soleil} = 1,4 \text{ tonnes/m}^3$$

# Pourquoi un modèle classique ?

les quantas en sont à leur début

1900 : Planck hypothèse de quanta (grains) d'énergie  $E=h\nu$

(h très petit:  $6.6 \cdot 10^{-34}$  joule seconde (MKSA) ,  $1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}$  joule)

1905 : Einstein invente le photon quanta de lumière et d'énergie

(1911 : Rutherford modèle planétaire)

1913 : Bohr : orbite  $e^- \cong$  niveau (palier) d'énergie, saut  $\Rightarrow$  photon

la notion de particule en tant que pur objet ponctuel faiblit...

1924 : De Broglie dualité onde-corpuscule  $\lambda = h/p$

$\Rightarrow$  caractère ondulatoire non négligeable qd  $\lambda$  a les dimensions de l'objet

Ex:

nous :  $m \sim 70\text{kg}$ ,  $v = 4\text{km/h}$  ( $144 \cdot 10^5$  m/s)  $\Rightarrow \lambda = 6.6 \cdot 10^{-34} / (70 \times 144 \cdot 10^5) = 6,6 \cdot 10^{-41}$  m !

alpha de Rutherford ( $E \sim 5\text{MeV}$ ) :  $p = \sqrt{2mE} \Rightarrow \lambda \approx 10^{-15}$  m

$$\lambda = h / \sqrt{2mE} \Rightarrow \text{corollaire :}$$

Plus l'énergie de la particule est grande plus elle est fine en tant que sonde

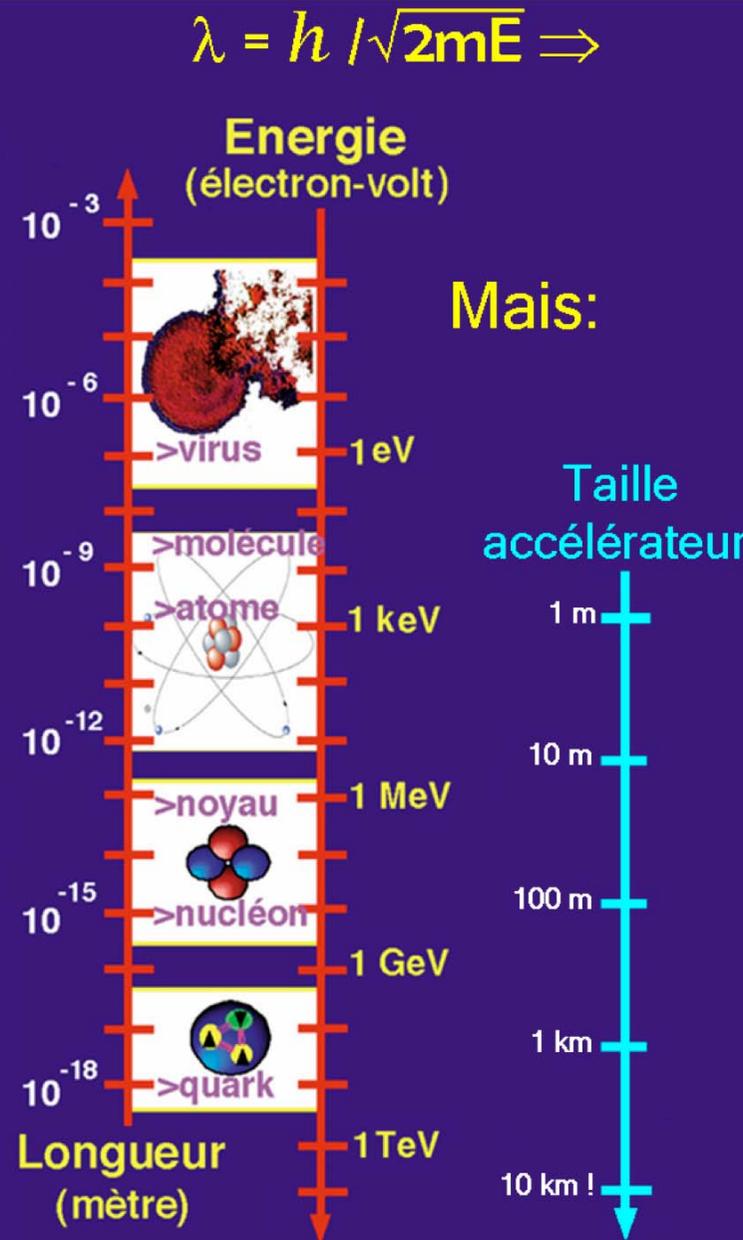
# D'où la course à l'énergie



Microscope électronique



Accélérateur linéaire (SLAC)



Cyclotron (AGOR)



Synchrotron (LHC)

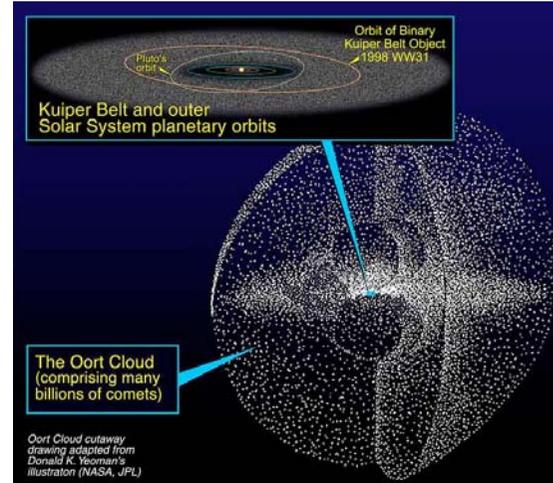
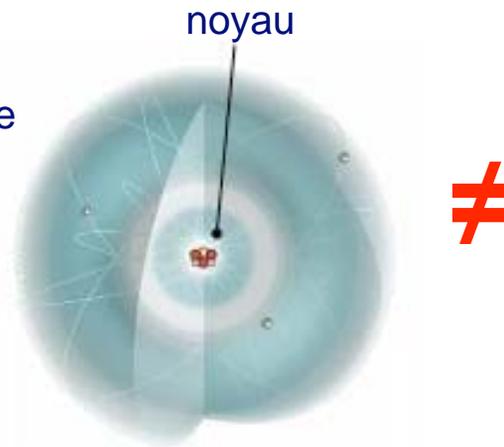
# Pourquoi un modèle classique ?

quant à la vision probabiliste ...(15 ans plus tard)

1926 : Schroedinger particule décrite par une fonction d'onde

1927 : Heisenberg comportement insaisissable des particules

nuage électronique  
autour noyau



nuage de Oort  
(comètes)  
autour  
système solaire

Image moderne d'une ionisation:

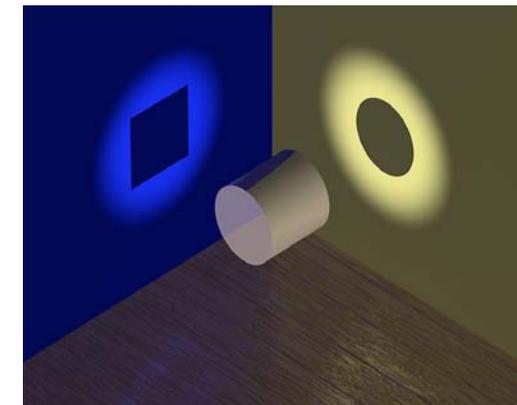
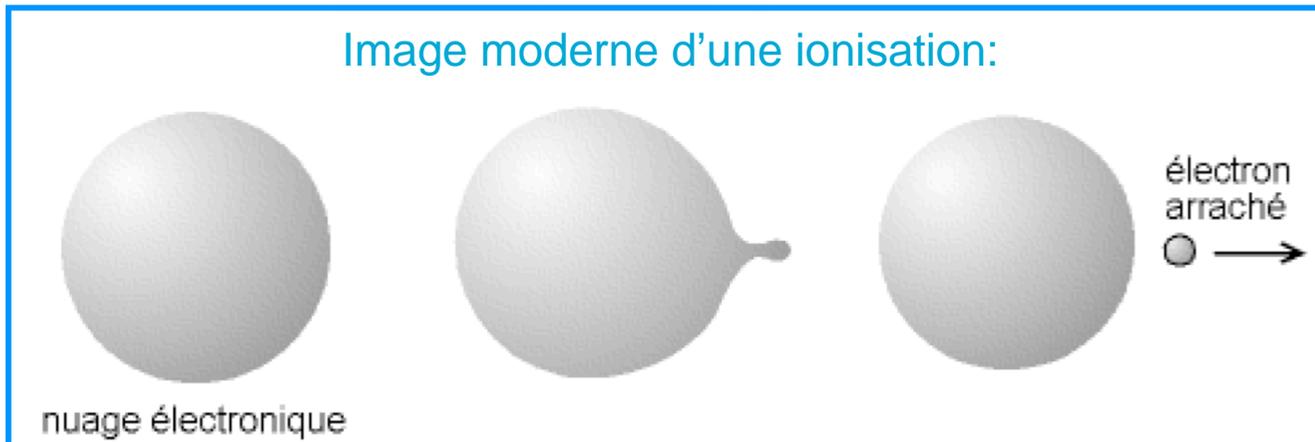


Image de dualité classique

source images: nuage de Oort, NASA and A. Feild (Space Telescope Science), <http://www.solarviews.com/cap/comet/kuiper3.htm>

nuage électronique: [http://www.cea.fr/jeunes/themes/la\\_radioactivite/l\\_atome](http://www.cea.fr/jeunes/themes/la_radioactivite/l_atome),

2: [http://fr.wikipedia.org/wiki/Image:Atome\\_electronejecte.png](http://fr.wikipedia.org/wiki/Image:Atome_electronejecte.png)

# des composants et leurs forces manquaient 1

Un noyau, petit de charge +, comment cela tient-il ?

1918 : Rutherford expériences faisceau d' $\alpha \Rightarrow$  noyau H  $\equiv$  1 proton  
atome = Z protons et Z  $e^-$  .... mais protons se repoussent (Coulomb)!

1920 : Rutherford hyp. d'1 doublet neutre (proton, $e^-$ ) ("neutron") dans le noyau

1932 : le neutron (Chadwick) **particule pas doublet**, N neutrons dans noyau

Noyau =  ${}^A_{Z+N}X_N$  deux types de nucléons mais qu'est-ce qui les unit ?

$\Rightarrow$  nécessité d'une nouvelle force, la **force nucléaire** qui en fait un **état lié**

**Attention l'image qui va suivre n'est qu'une image ...public averti**

et forcément classique (fausse) pour un **état lié à 2 composants** : mayonnaise



**tient toute seule,  
sans bouteille ni coquille**

émulsion huile et eau,  
liée par liaison hydrogène (électrostatique)  
grâce protéines œuf (tensioactives)  
jouent rôle int. forte)

1935 : Yukawa, première théorie de l'interaction forte

(1964-70 : quarks, théorie standard QCD)

source images: huile, fouet et œufs : [http://www.meilleurduchef.com/cgi/mdc/l/fr/boutique/produits/sim-bouteille\\_pili.html](http://www.meilleurduchef.com/cgi/mdc/l/fr/boutique/produits/sim-bouteille_pili.html)

mayonnaise: [http://justhungry.com/2006/02/basics\\_mayonnai.html](http://justhungry.com/2006/02/basics_mayonnai.html)

# des composants et leurs forces manquaient 2

Pourquoi est-ce instable ?

(qu'est-ce qui fait tomber la mayonnaise nucléaire)

1896-1899: Becquerel puis Rutherford radioactivités  $\beta^-$  (émission d'  $e^-$ ,  $e^+$ ),  
alpha et gamma

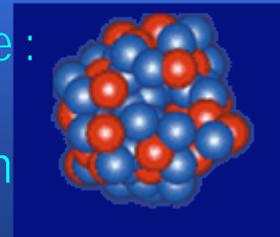
1930 : Pauli hyp pour  $\beta^-$   $\Rightarrow$  particule indétectable le neutrino de masse nulle

1934 : Fermi élabore une théorie d'une force nucléaire faible

(1961-1967 : Glashow, Weiberg et Salam théorie standard interaction faible)

Structure du noyau dans ces cours  
état lié de protons et de neutrons  
en interaction (coulombienne, forte, faible)

La représentation du noyau comme :  
(grappe de raisin de Rutherford)  
indique ce niveau d'approximation



Autre simplification dans ce cours : pas de relativité

...déjà bien du fil à retordre pour  
la physique nucléaire....

(ou pourquoi près de 100 ans après Rutheford on en fait encore ....)

Connaître le proton et le neutron n'est pas connaître le noyau !

Le poids d'un noyau n'est pas la somme des poids de ses nucléons

Si quelques noyaux sont stables, la plupart sont instables (telle la mayonnaise),  
ils ne sont pas tous actuellement sur terre

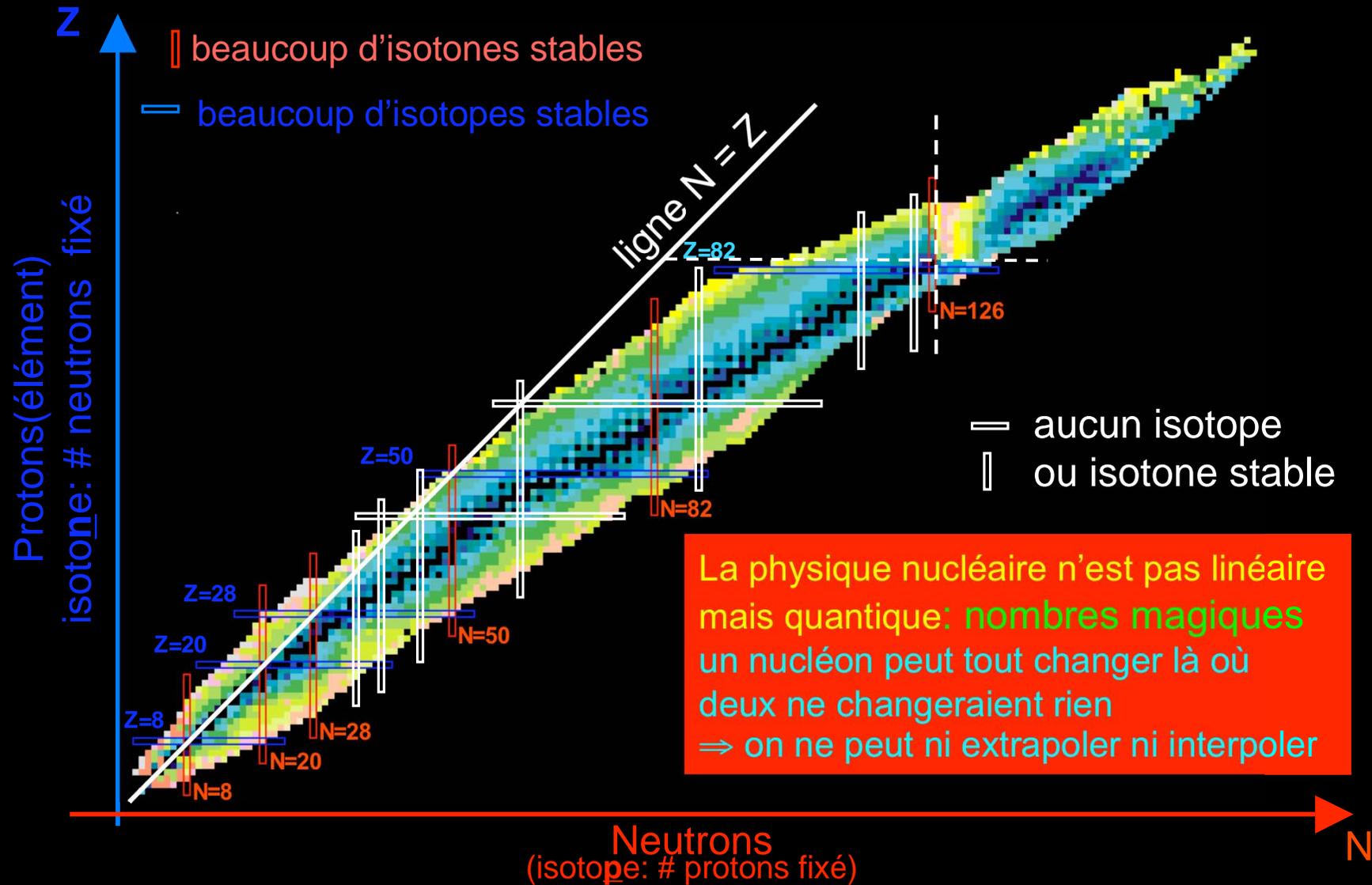
⇒ il faut les CREER

Il n'existe pas de « bouteilles » de proton ou de neutron

⇒ pour les créer il faut partir au moins d'un noyau déjà créé ou existant

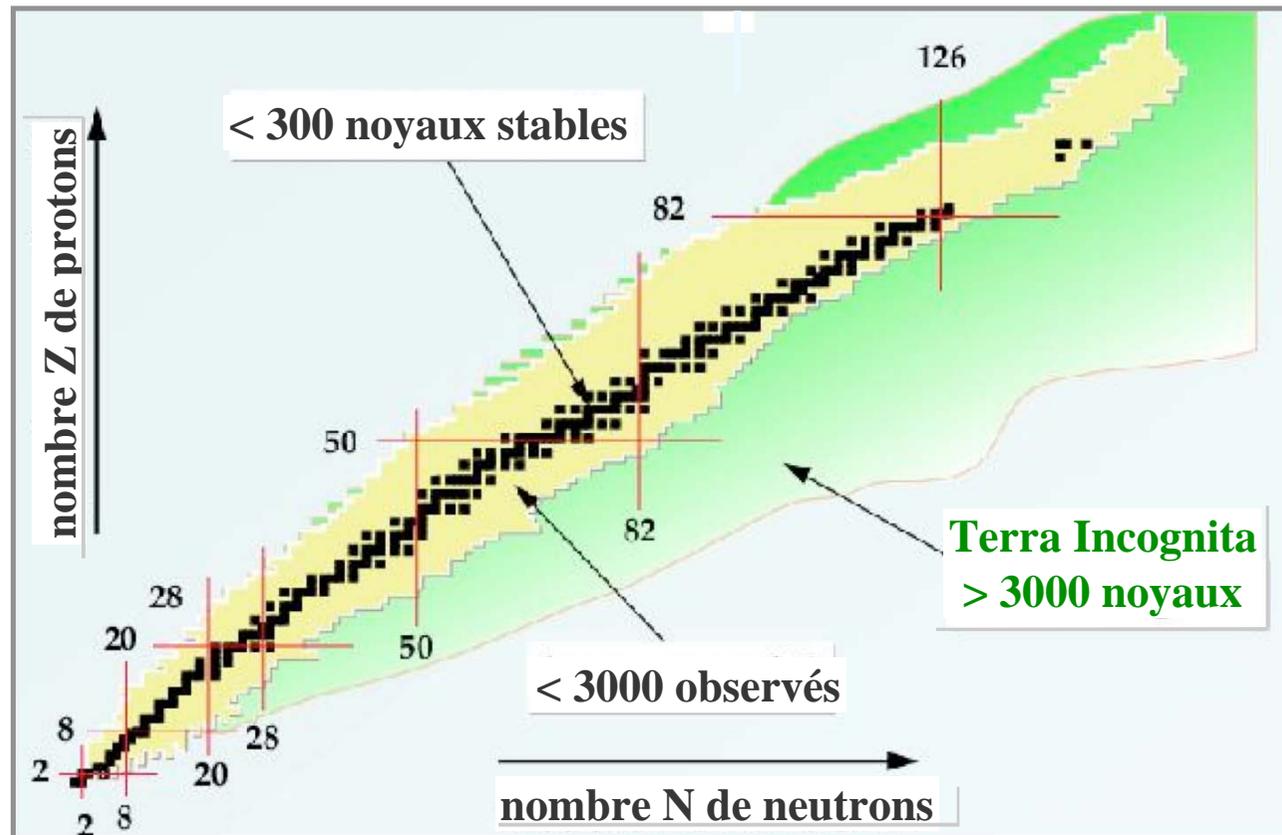
Nécessité des expériences  
sur accélérateurs....

# Carte des ~3000 noyaux connus



⇒ il faut créer et étudier chaque noyau!

# ...Vaste Programme !



Attention ! Observés ne veut pas dire étudiés...mais plutôt synthétisés

étudier = caractériser statiquement et dynamiquement un noyau

• quelle est sa masse, sa taille, sa forme ?

• que se passe-t-il quand on lui fournit de l'énergie (ou excitation)?

⇒ il faut produire chaque noyau en grand nombre

# Qu'est-ce que la masse des noyaux ?

$M({}^A_ZX_N) < N m_n + Z m_p$  il y a un Défaut de masse  
1905:  $E = Mc^2$  énergie  $\Leftrightarrow$  masse (Einstein–Poincaré)

Masse en trop ? Energie de liaison =  $-B(N,Z) < 0$

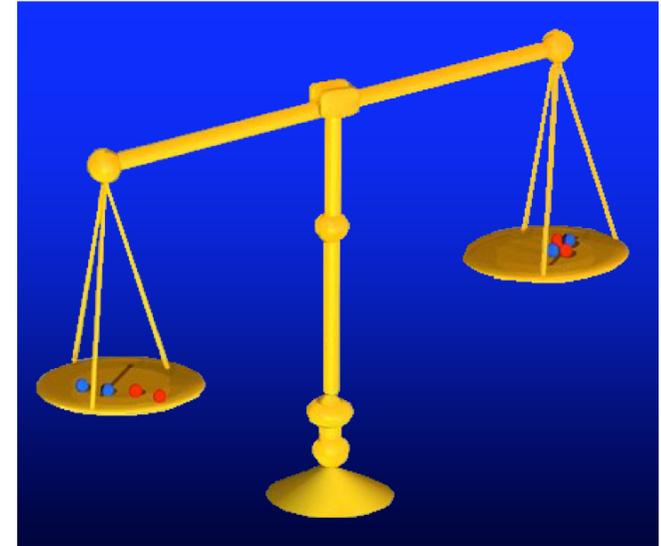
$$M({}^A_ZX_N) c^2 = N m_n c^2 + Z m_p c^2 - B(N,Z)$$

B : énergie qu'il faut apporter au noyau pour en dissocier tous les nucléons

B non négligeable dans le noyau (max 1%)

Mais entre atome-électrons de qq $\times 10^{-19}$  J  $\Rightarrow$  négligeable au quotidien

c'est B qui permet les noyaux stables (durée de vie  $\sim$  âge de l'univers, ou proton)

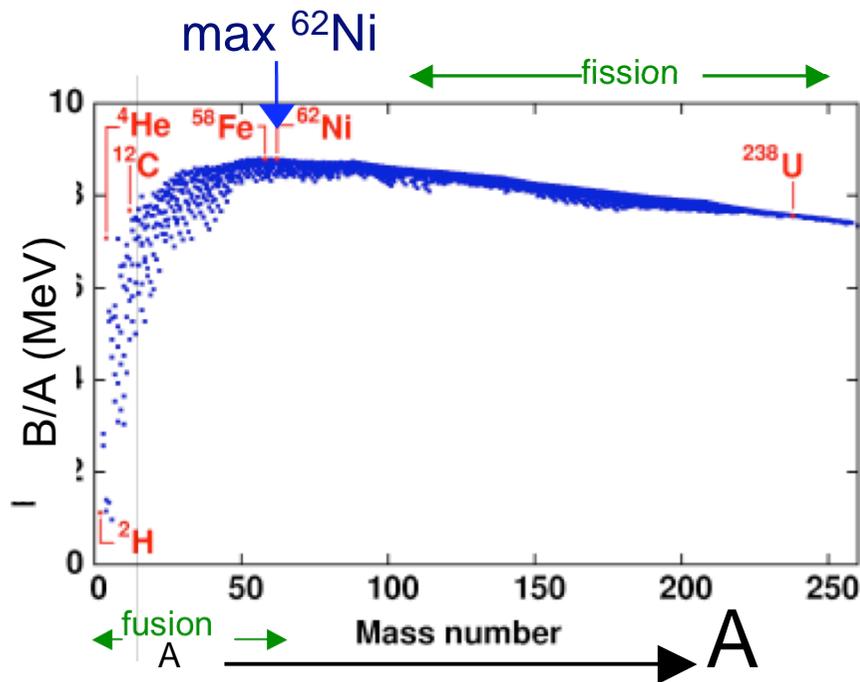
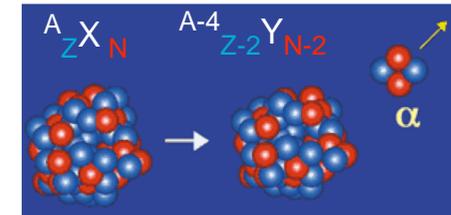


# Energie de liaison et stabilité

Condition nécessaire d'une décroissance

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

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



Ex radioactivité  $\alpha$  ( $^4_2\text{He}$ ):

$$Q = Nm_n c^2 + Zm_p c^2 - B(N, Z) - (N-2)m_n c^2 + (Z-2)m_p c^2 - B(N-2, Z-2) - 2m_n c^2 - 2m_p c^2 - B(^4\text{He})$$

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

$\Rightarrow$  zone favorable à radioactivité  $\alpha$

$$B(N-2, Z-2) - B(N, Z) \geq 0$$

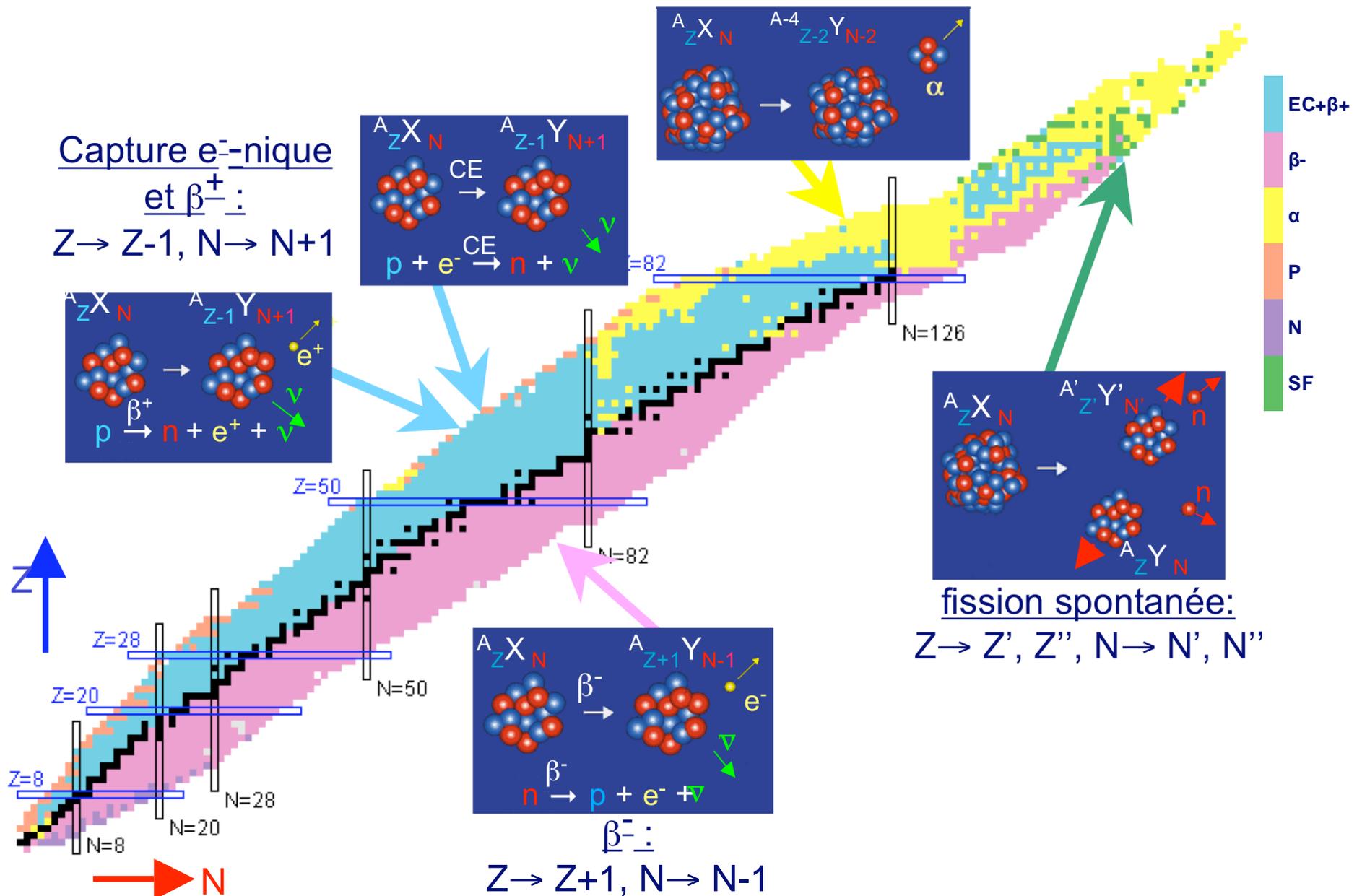
$$\Rightarrow B(A-4)/(A-4) \geq B(A)/A$$

$$(A/(A-4) \sim 1 \text{ si } A \text{ gd})$$

$B(A) > B(A)$  : zone lourds  $\Rightarrow$  favorise perte de matière (fission,  $\alpha$ )  
 $B(\bar{A}) > B(A)$  : zone légers  $\Rightarrow$  favorise prise de matière (fusion)

N. B : fusion spontanée impossible  $\Leftrightarrow$  répulsion coulombienne des noyaux

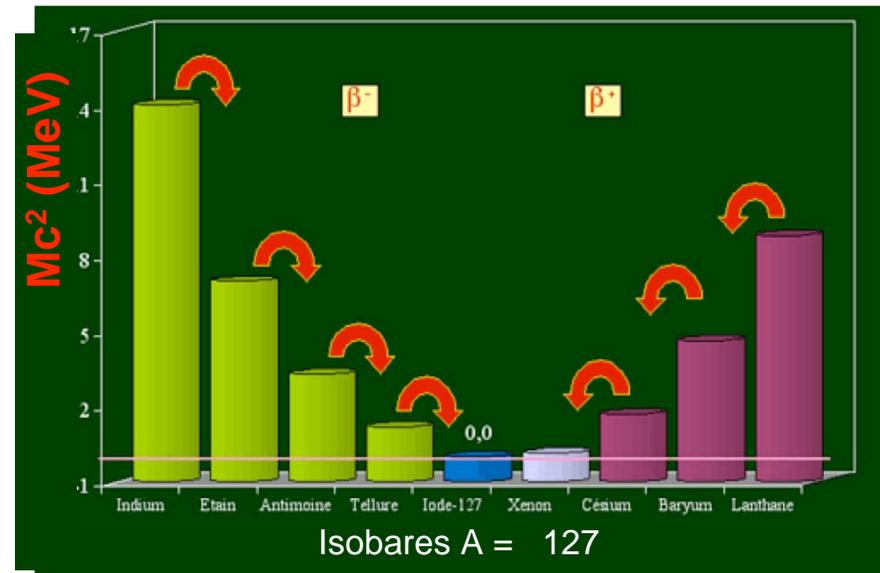
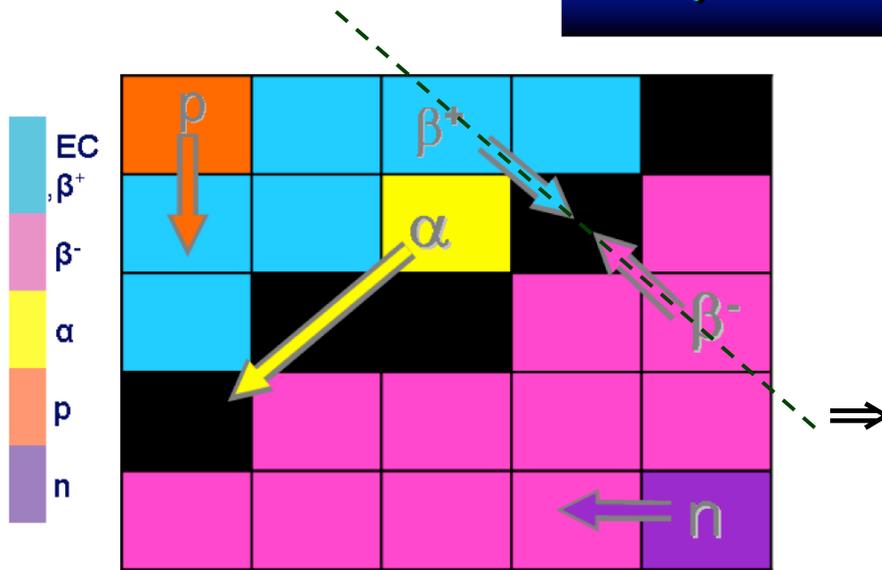
# Energie de liaison et stabilité



sources images: carte : <http://www.nndc.bnl.gov/chart/>,

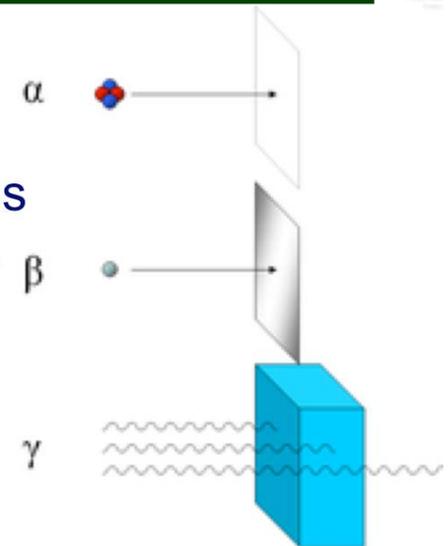
radioactivités à partir de : [http://www.astrosurf.com/m80/documents/conférences\\_robert/basesnuclear.ppt](http://www.astrosurf.com/m80/documents/conférences_robert/basesnuclear.ppt)

# "Vallée" de stabilité



La radioactivité  $\alpha$  c'était tonique alors on prenait du radium en pillules...

Distinction entre eux  
phénoménologique :  
Radioactivités observées  
souvent accompagnées  
d'un rayonnement  
appelé  $\gamma$  (après  $\alpha$  et  $\beta$ )  
(et dont il sera question  
plus tard)



# Décroissance radioactive

Quantité de noyaux d'un élément X radioactif ( $\alpha$ ,  $\beta^\pm$ ) décroît au cours du temps

Impossible de prédire l'instant t où va se produire la désintégration:

phénomène aléatoire

⇒ loi statistique:

Pour un échantillon de N noyaux X présents à t, nombre de désintégrations

$dN = (N(t+dt) - N(t))$  entre t et t+dt, ne dépend que de N et de dt,

soit dN proportionnel à N et à dt :

⇒  $dN = -\lambda N dt$ , (avec  $\lambda$  constante radioactive ou probabilité par unité de temps qu'un noyau se désintègre)

⇒  $dN/N = -\lambda dt \Rightarrow \ln(N(t)) = -\lambda t + cste$

⇒ nombre de noyau de X à l'instant t :  $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$

(loi parfois écrite avec demi-vie  $T_{1/2} = \ln 2 / \lambda$ , durés où il ne reste plus que N/2 des X)

Durée de vie (moyenne) ou période d'un noyau X :  $\tau = 1 / \lambda$

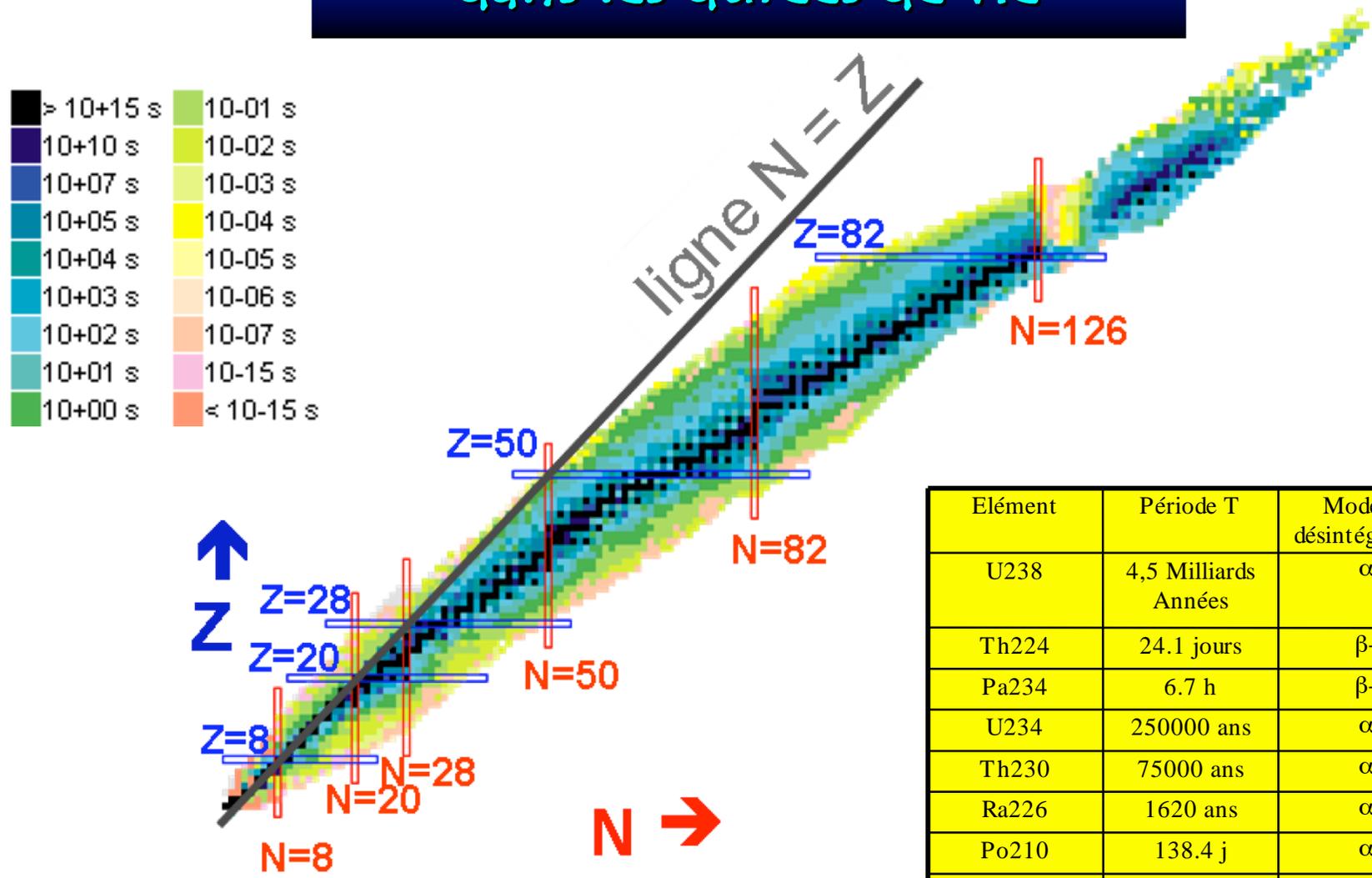
Nombre de désintégrations par unité de temps =  $\mathcal{A}(t)$  l'activité =  $\lambda N(t)$

⇒  $\mathcal{A}(t) = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = \mathcal{A}_0 e^{-\lambda t}$

en Becquerel : 1 Bq = 1 désintégration par seconde

ou Curie : 1 Ci =  $3,7 \cdot 10^{10}$  dés./s

# Plus de 30 ordres de grandeur dans les durées de vie

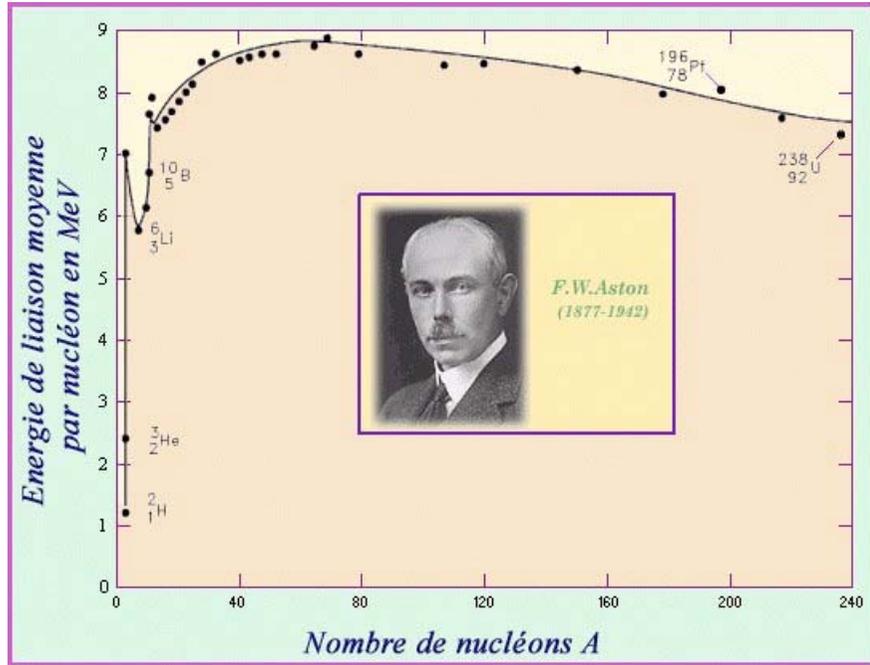


Élément	Période T	Mode de désintégration
U238	4,5 Milliards Années	$\alpha$
Th224	24.1 jours	$\beta^-$
Pa234	6.7 h	$\beta^-$
U234	250000 ans	$\alpha$
Th230	75000 ans	$\alpha$
Ra226	1620 ans	$\alpha$
Po210	138.4 j	$\alpha$
Tl206	4.2 min	$\beta^-$

sources : carte : <http://www.nndc.bnl.gov/chart/>

exemples : [http://www.astrosurf.com/m80/documents/conférences\\_robert/basesnuclear.ppt](http://www.astrosurf.com/m80/documents/conférences_robert/basesnuclear.ppt)

# Energie de liaison : vue macroscopique



propriétés macroscopiques:

$1 < A < 16$   $|B|/A \nearrow$  puis  $A$   $|B|/A \sim \text{cst} \Rightarrow$   
**saturation** : 1 nucléon interagit avec peu  
de nucléons, **interaction forte courte**

**portée**

$R \propto A^{1/3}$  **densité constante**

$\Rightarrow$  goutte liquide sphérique (LDM)  
uniformément chargée



# Energie de liaison : formule de masse

Formule de masse  $B_{BW}$  (BW pour Bethe 1935 et Weissäcker 1936):

$$B_{BW} = E_v - E_s - E_c - E_l + \delta(A)$$

**terme de volume (A)** : chacun des nucléons contribue également

**terme de surface ( $A^{2/3}$ )**: on a trop compté de liaison pour eux (hyp. sphère)

**Energie Coulombienne ( $Z^2/A^{1/3}$ )** : répulsion, permet de comprendre origine de fission



combat répulsion charges et  
tension de surface  $\Rightarrow$   
paramètre de fissilité =  $Z^2/A$



**terme d'asymétrie ( $[N-Z]^2/A$ )**: nécessaire sinon noyau  $\equiv$  neutrons

(+int. n-p favorise stabilité (Pauli))

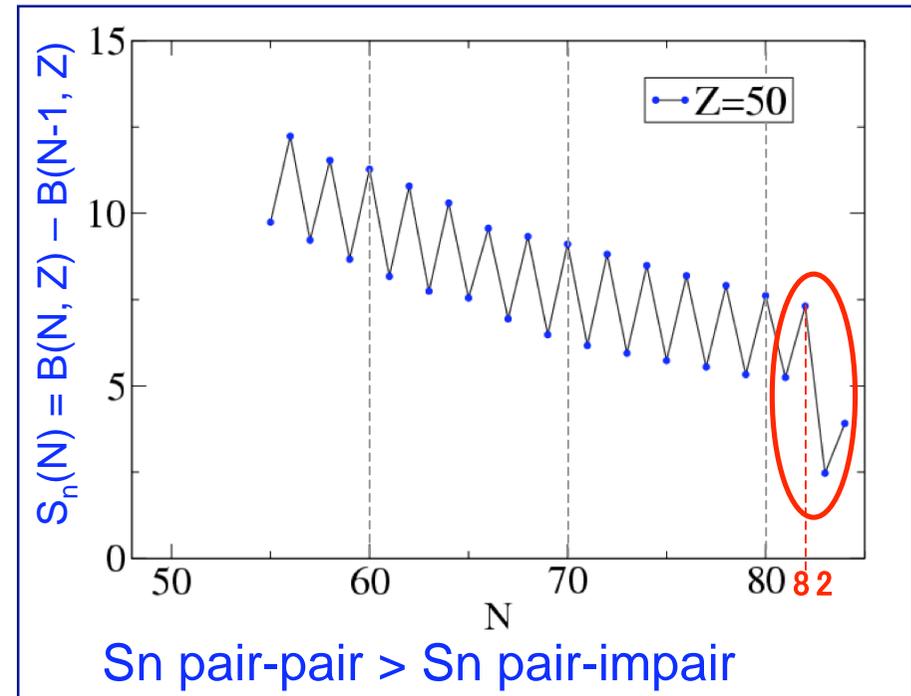
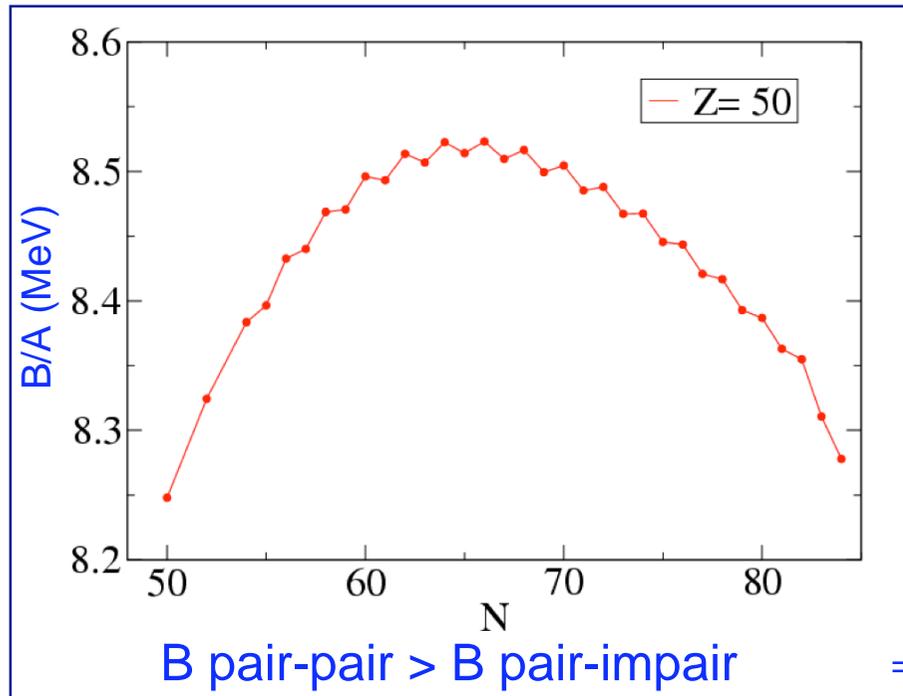
Rq : si  $|N-Z|$  trop grand  $B \leq 0$  : émission spontanée proton, neutron

**terme d'appariement**

# Effet d'appariement

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

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

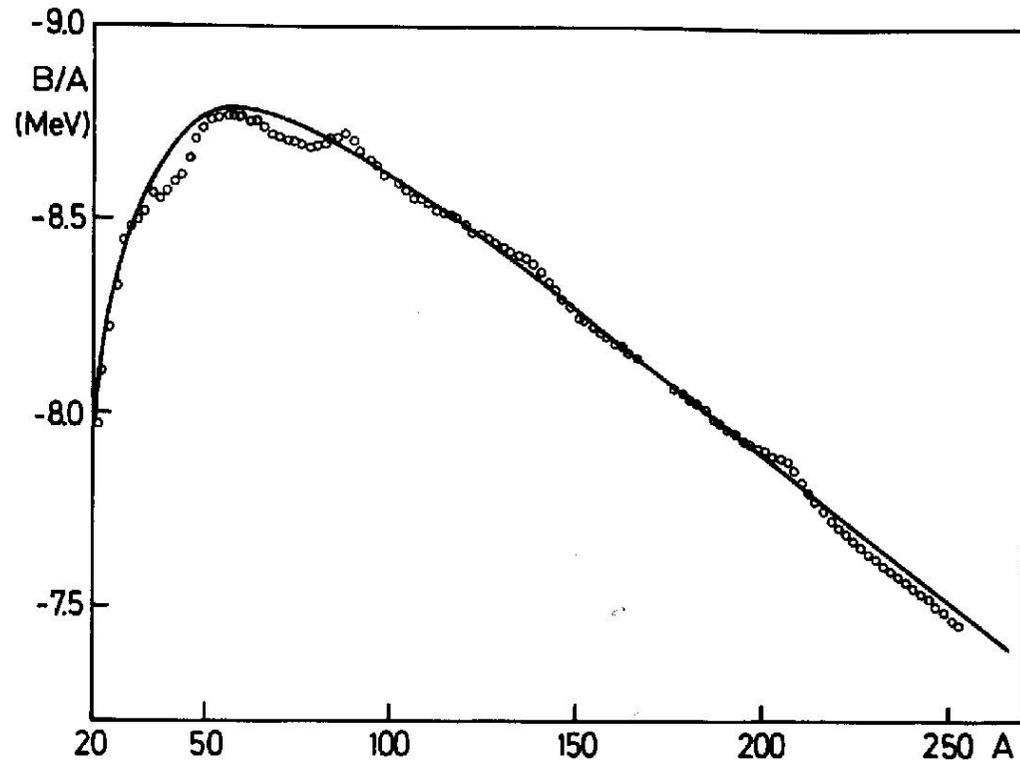


$S_n$  est l'énergie de séparation d'1 neutron, car nécessaire pour libérer le "dernier" neutron

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

# Réel succès du modèle de la goutte liquide :

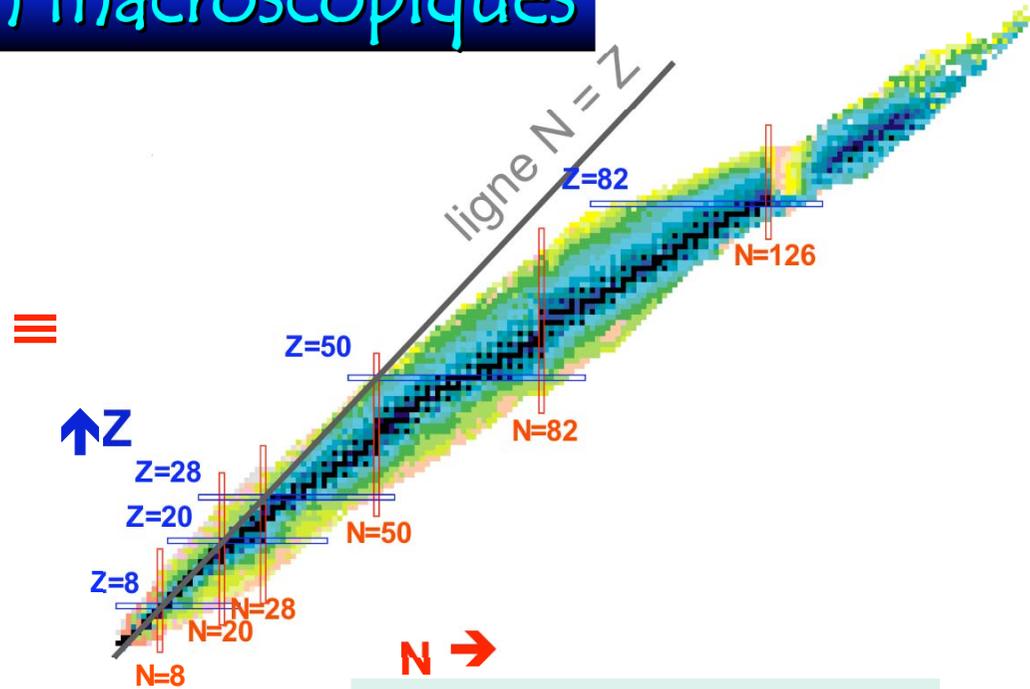
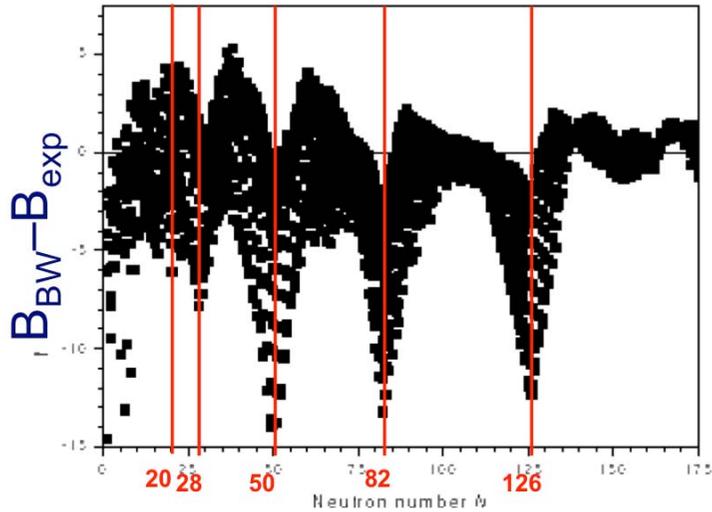


- valeurs expérimentales
- courbe calculée  
avec formule goutte liquide

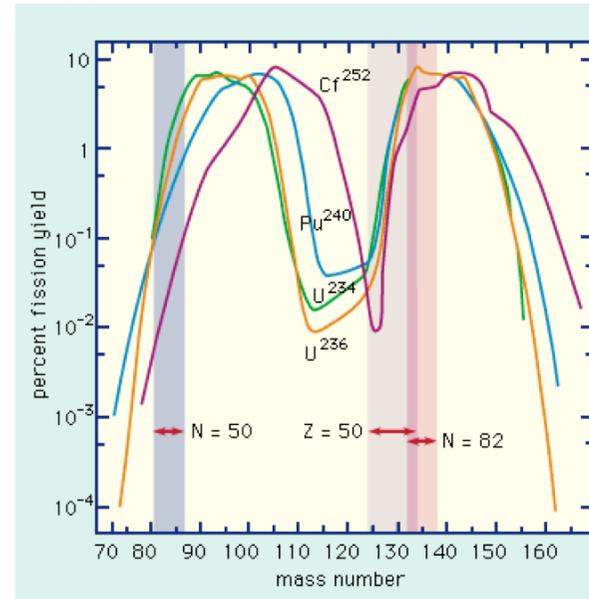
Figure 1.2. Experimental values of  $B/A$  for  $\beta$ -stable odd- $A(o)$  nuclei and the calculated curve using a mass formula similar to Eq. (1.4). (From [Ho 75].)

en plus donne explication de la fission  
MAIS...

# Effets non macroscopiques



fission spontanée de  $^A X$  :  
 on devrait observer 2  
 fragments de fission de  
 masse  $A/2$   
**Mais on observe:**



source images: d'eau : <http://www.agora-photo.com/goutte-d-eau-435.html>, carte : <http://www.nndc.bnl.gov/chart/>,  
 figure  $B_{exp}-B_{th}$  : D. Lunney, J.M. Pearson and C. Thibault., Rev. Mod. Phys. vol. 75 (2003),  
 production fission spontanée: <http://concise.britannica.com/ebc/art-666>

# 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

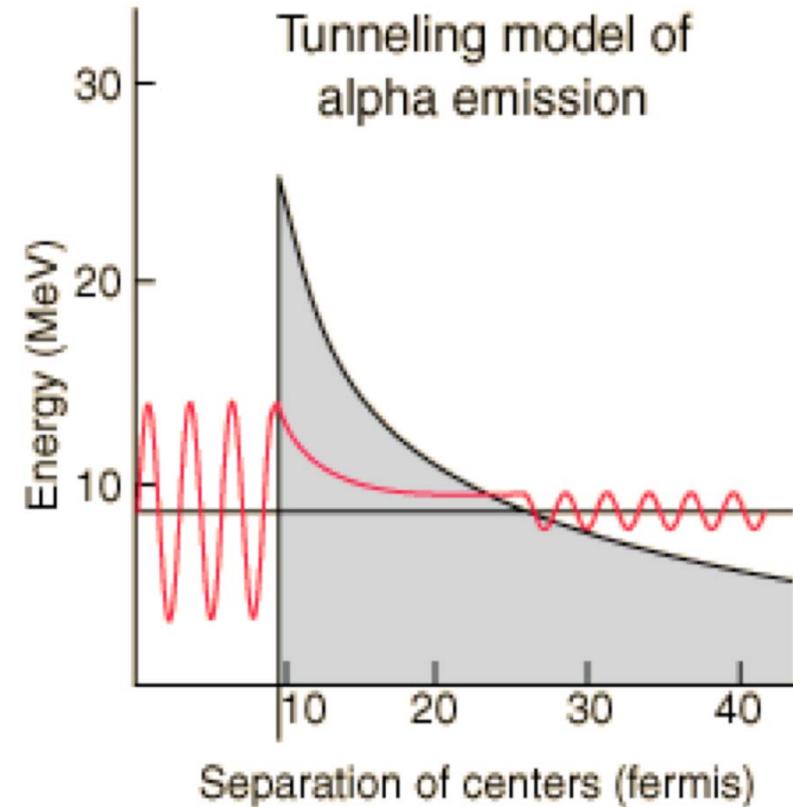
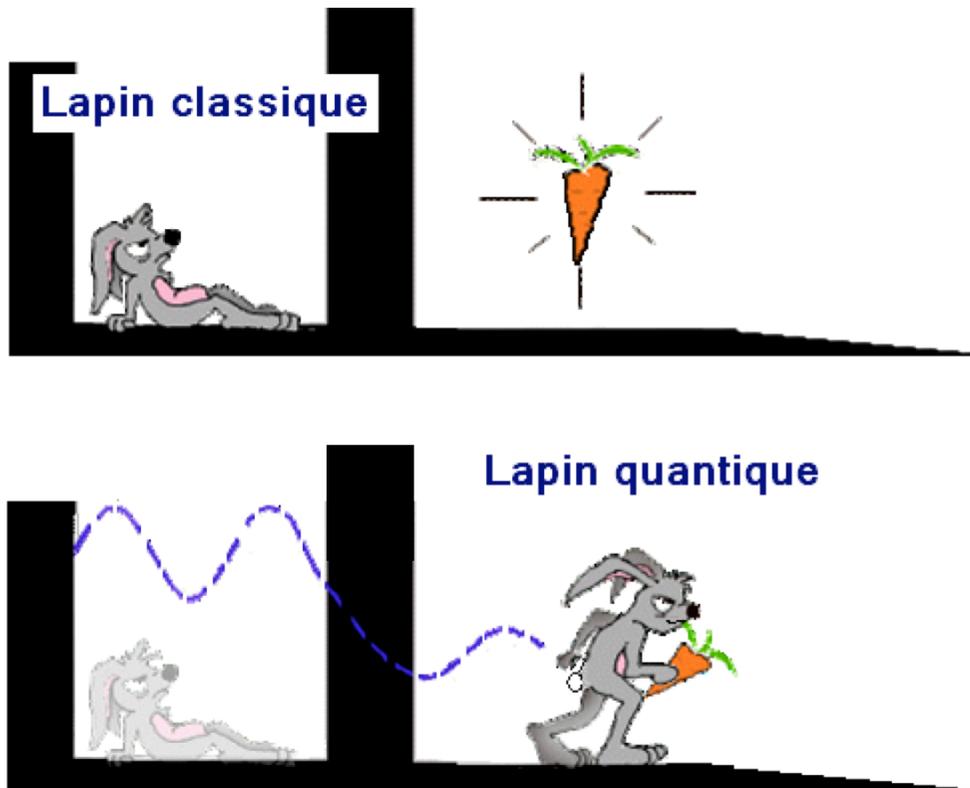
$\Leftrightarrow$  émission  $\alpha$  spontanée impossible

**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



⇒ nécessité d'un modèle  
quantique

Chap II      Un noyau:  
du classique au quantique  
du macroscopique au microscopique  
du collectif et de l'individuel  
aspect quantique

# Les nucléons sont des fermions

Avec un **spin**  $\frac{1}{2}$  entier, les **nucléons** sont, comme les **électrons** de l'atome, des **fermions**, des objets quantiques :

**spin** : propriété quantique intrinsèque, permet de caractériser le comportement, la symétrie d'une particule sous l'effet de rotations.

Une particule a un spin  $s$  si invariante par rotation d'angle  $2\pi/s$ . (ou  $360^\circ/s$ )

Ex : si les cartes à jouer étaient quantiques



$\neq$   
 $\curvearrowright$   
 $180^\circ$



$s = \frac{1}{2} \Rightarrow$  rotation de 2 fois  $360^\circ$   
pour retrouver l'objet  
**n'existe pas à notre échelle !**

si **nucléons** comme **électrons**

$\Rightarrow$  modèle du gaz d'électrons libres dans un métal (Fermi-Sommerfeld, 1927)  
(explique conductivité, capacité calorifique)

# Un modèle de gaz ????

modèle du gaz d'électrons (fermions spin  $\frac{1}{2}$ ) libres dans un métal  
(1927 : Fermi-Sommerfeld pour expliquer conductivité, capacité calorifique)

**PARADOXE pour le noyau** : gaz  $\Leftrightarrow$  particules (quasi) indépendantes  
pourtant interaction forte à très courte portée !

**Principe de Pauli (1925)** : deux fermions indiscernables (2 e<sup>-</sup>, 2 protons, etc)  
ne peuvent simultanément être dans un même état quantique

$\Rightarrow$  les nucléons ne peuvent se rapprocher les uns des autres, ils sont comme  
**libres dans le noyau** (libre parcours moyen  $\approx$  taille du noyau), dont les limites  
dans l'espace sont définies par l'ensemble des  $A-1$  autres nucléons.  
 $\equiv$  clef de la « solution » au problème à  $N$  corps ( $A$  ici) en physique nucléaire.

**Approximation du potentiel moyen**

**$A$  nucléons interagissant deux à deux  $\equiv$  1 nucléon dans un champ de force**

Potentiel moyen que l'on va pouvoir décrire avec des approximations

C'est un des aspects du travail du physicien :

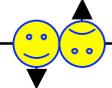
En cas de problème difficile, impossible à résoudre en l'état  $\Rightarrow$  utiliser et justifier des approximations

# Application du gaz de Fermi au noyau

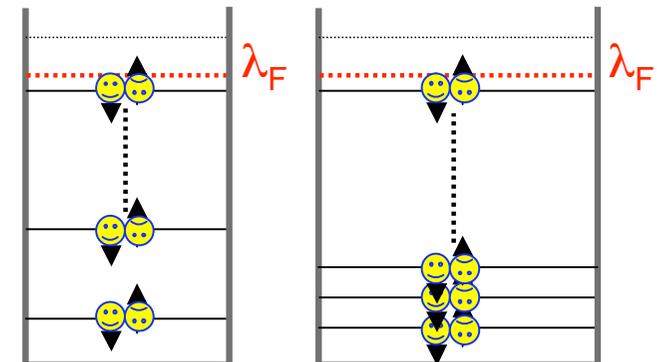
approximation :

⇒ nucléons ne sentent que les limites du noyau que l'on peut en plus approximer par une boîte (murs infini  $\Leftrightarrow$  puits potentiel).

Approximation Boîte carrée murs  $\infty$  :

on remplit états quantiques (en classique: orbite) du potentiel Fermions (Pauli)  $\Rightarrow$  si identiques deux au max par état avec spins opposés:  (tête-bêche)

états quantiques occupés jusqu'à un niveau  $\lambda_F$  appelé **niveau de Fermi** dont énergie  $\varepsilon_F$  est la même pour ts les noyaux.  
⇒ hauteur du puits constante

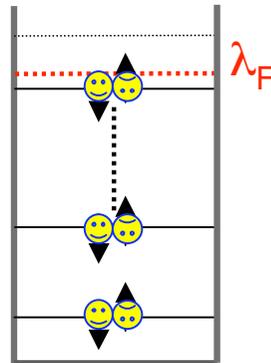


⇒ Si  $A \nearrow$ , volume noyau (de la boîte)  $\nearrow$ ,  
mais profondeur  $c^{ste} \Rightarrow$  les états se resserrent  
forme puits change  $\Leftrightarrow$  espacement niveaux change

Rq: Les protons ont en plus la répulsion coulombienne,  $\Rightarrow$  2 gaz distincts  
profondeur puits proton un peu - grande (asymétrie)

# Niveaux dans puits de potentiel

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 (pas de son  
dans le vide)

# Au crédit du modèle de gaz de Fermi

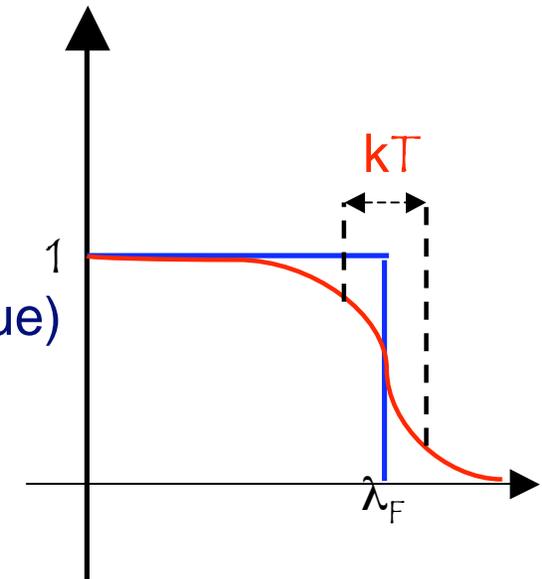
- permet de justifier et de retrouver les paramètres du modèle de goutte liquide
- donne des résultats en accord avec expérience:  
(profondeur du puits  $\Leftrightarrow$  densité cste  $\Leftrightarrow$  saturation)
- plus satisfaisant intellectuellement

**Mais**

## Chgt dans la notion de température

Dans un gaz, par collisions  $T \Leftrightarrow \langle v^2 \rangle$  (statistique classique)

Dans un noyau seuls les nucléons proches du niveau de Fermi peuvent être excités par augmentation de  $T$ ...  
(statistique quantique)



## Toujours pas de nombres magiques:

prendre des boîtes (des potentiels) plus réalistes : ressemblant plus à un noyau qu'une boîte carrée aux murs infinis.....

# potentiel plus adapté

L'oscillateur harmonique (force de rappel centrale)  
en mécanique classique

(oscillations) vibrations de pulsation  $\omega$   
puits de potentiel : il ne peut échapper au mvt

Quantique :

couches régulièrement espacés  $E = N \times \hbar\omega$

chacune contient beaucoup plus que 2 nucléons

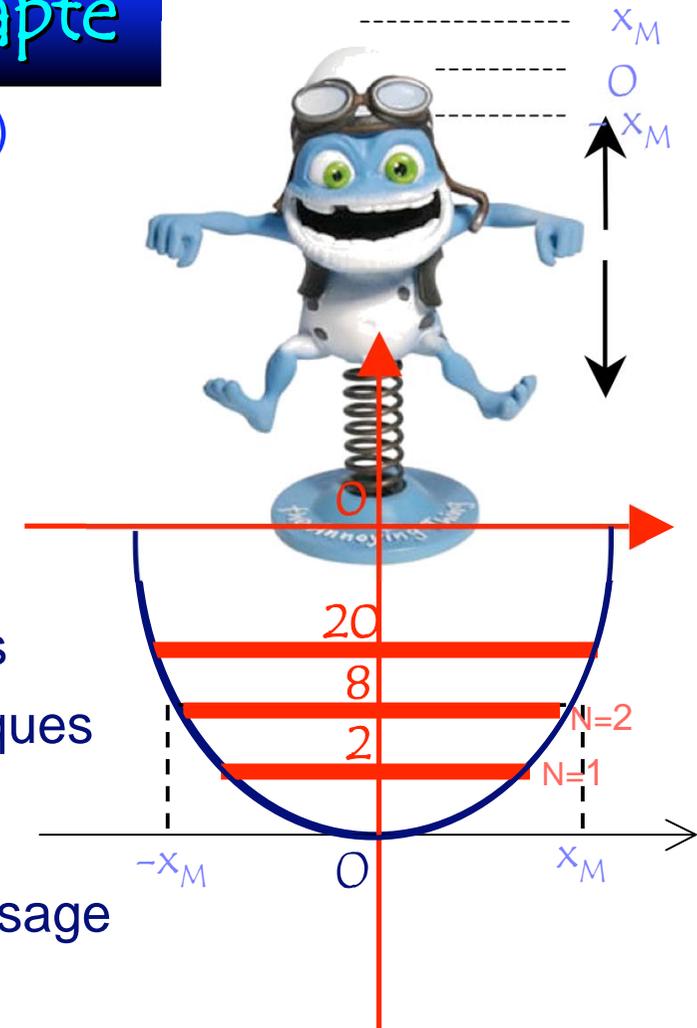
$\Leftrightarrow$  « recouvre » beaucoup de sous-états quantiques  
entre couches des espaces  $\Leftrightarrow$  nombres

**MAIS** ces nombres qui correspondent au remplissage  
de chaque couche ne sont pas les bons... :

2, 8, 20, (jusque là tout va bien) mais : 40, 70, 112 au lieu 28, 50, 82, 126...

Et si on changeait la forme du puits ?

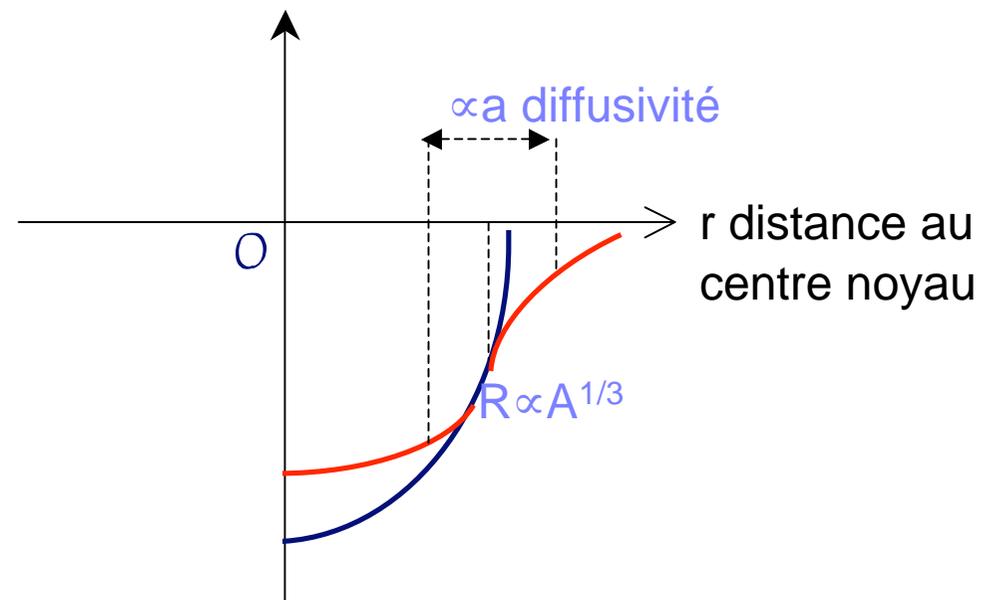
deux raisons pour cela : surface diffuse à T non nulle, rôle boîte dans  
espacement niveaux



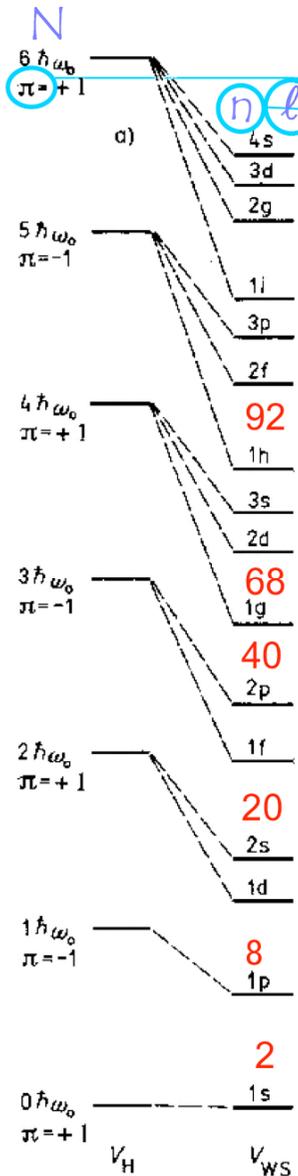
# Travaillons la forme du puits

surface du noyau diffuse à la manière de T du gaz de fermi,  
et fond du puits ~plat (potentiel constant intérieur du noyau)

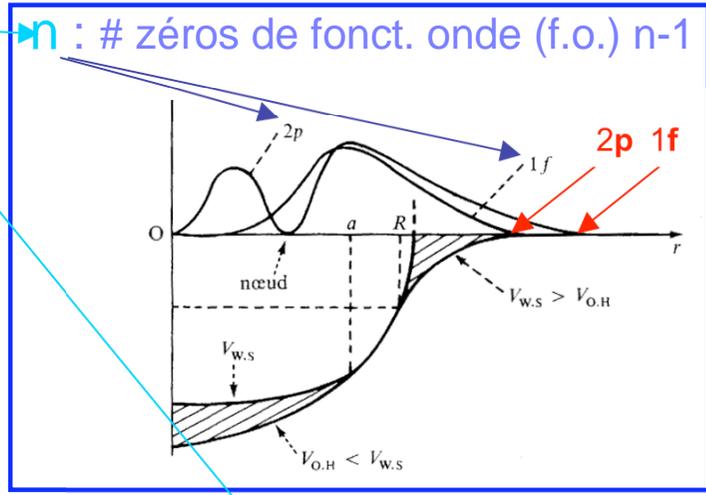
Woods-Saxon:  
bord diffus mais même volume



# potentiel de Woods-Saxon



$n$  : # zéros de fonct. onde (f.o.) n-1



$\pi$  = parité :  $r \rightarrow -r$   
 $\pi = +$  si f.o.(-r) = f.o.(r)  
 $\pi = -$  si f.o.(-r) = -f.o.(r)

$l$  : # quantique azimuthal ou moment angulaire orbital (en classique: moment cinétique)

s, p, d, f, g, h... pour  $l = 0, 1, 2, 3, 4, 5...$

**⇒ résultat insuffisant :**  
 on a séparé en sous-couches ( $n, l$ ) avec états grand  $l$  abaissés mais pas assez (ou pas les bons) pour arranger position gros espacements

- Rq :**
- grand  $l \Rightarrow$  plus grande extension spatiale vers la surface
  - ~ même schéma si Osc. Harm sph. -  $D^2$  (Nilsson)

sources images: fonctions onde et puits potentiel: L. Valentin, "Le monde subatomique"  
 schéma modèles en couche : <http://www.e18.physik.tu-muenchen.de/skript/img3572.gif>  
 fonction onde paires impaires <http://www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/divers/qpuits.html>

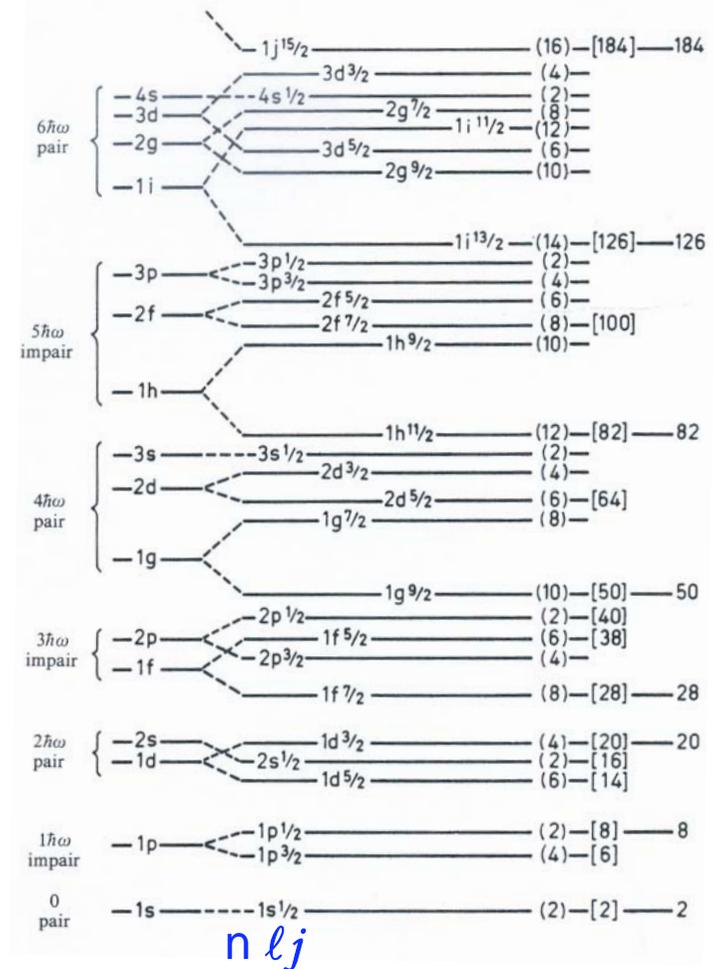
# Potentiel spin-orbite

idée de physique atomique:  
 potentiel spin-orbite, électrons  $s = 1/2$ ,  
 $\Rightarrow$  moment magnétique  
 $\Rightarrow$  interaction avec B créée par leur mvt dans E des protons du noyau (relativité)

Appliquée en physique nucléaire  
 M. Goppert-Mayer (1948) nucléons  $s = 1/2$   
 $\Rightarrow$  ajout d'un terme de spin-orbite

Résultat : **CA Y EST !**

Rq : Terme spin-orbite nucléaire  
 même ordre que potentiel moyen  
 $\Leftrightarrow$  pas même origine que celui  $e^-$  de l'atome  
 (mais origine dans nucléon-nucléon)



sous-couche séparées en  $n, l, j$   
 $j = "l + s"$  moment angulaire total  
 $(2j+1)$  nucléons dans 1 sous-couche  $n l j$

source image L. Valentin, "Le monde subatomique",

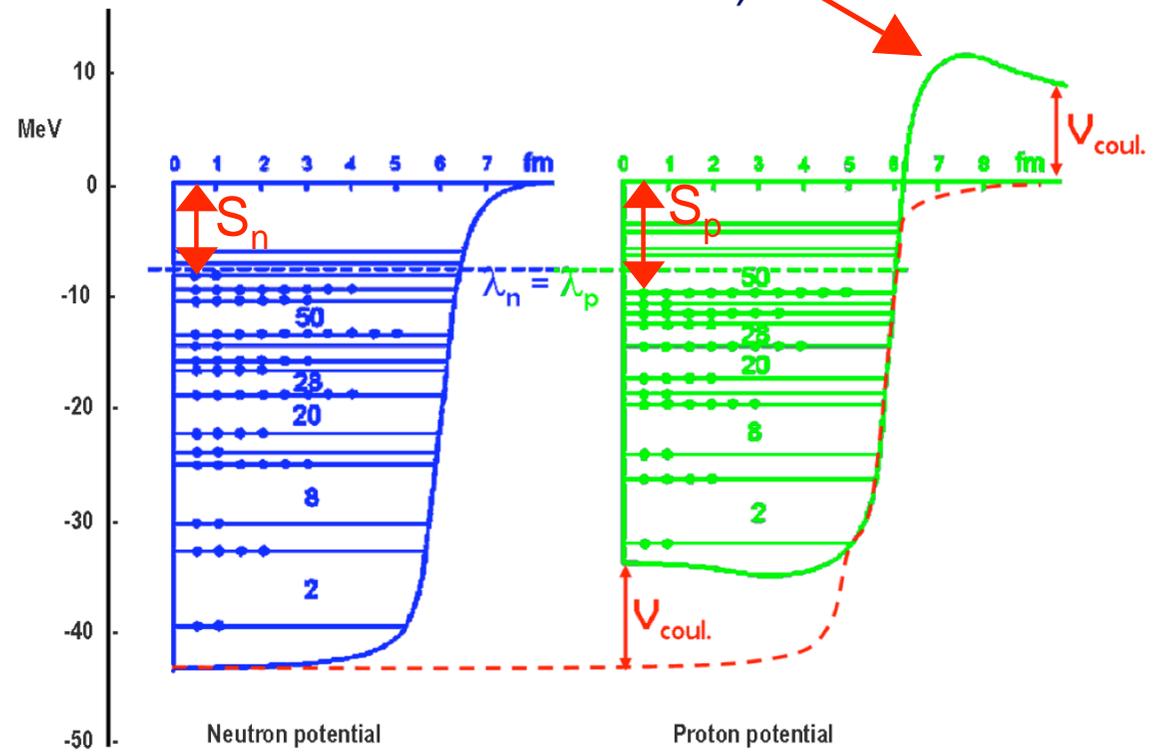
d'après allocution Nobel M. Goppert-Mayer [http://nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1963/mayer-lecture.pdf](http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1963/mayer-lecture.pdf)

I. Deloncle, Fréjus 2008

# Modèle en couches sphérique

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

**Pour les noyaux sphériques**  
si magique en neutrons (protons)  
 $\Rightarrow$  couche remplie et au dessus:  
I gap  $\Leftrightarrow$  stabilité.

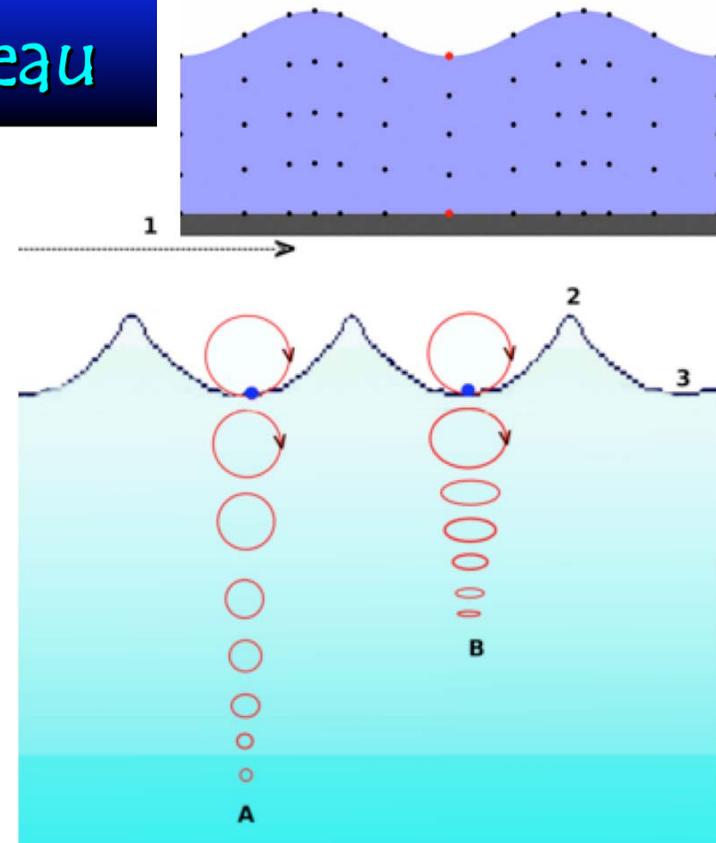


The  $^{116}\text{Sn}$  neutron and proton shell structure in the potential well. (According to S. G. Nilsson)

**Courage, on y est presque !**

**Noyau  $\equiv$  composition de tous ces états individuels de nucléons.**

# Les vagues de la mer et les gouttes d'eau



Classique:

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

Quantique:

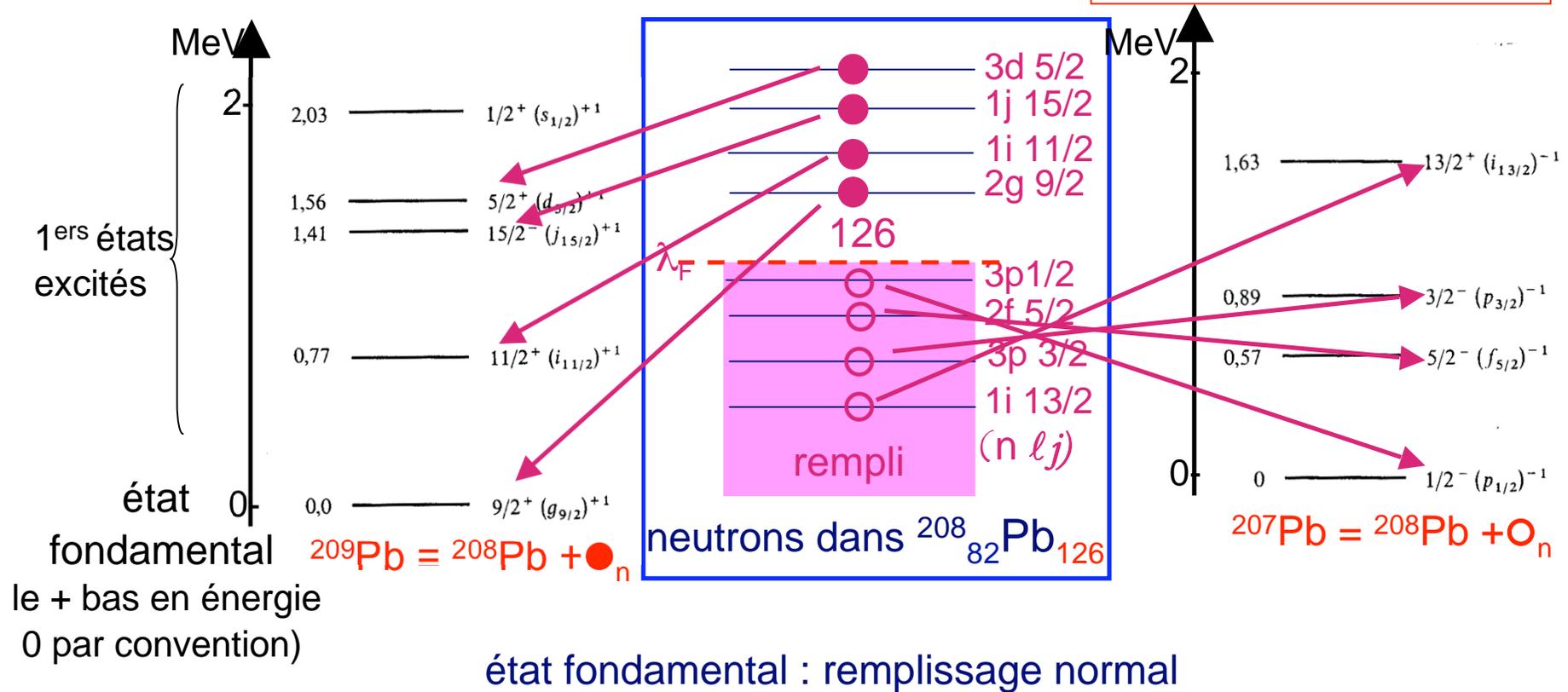
$\Sigma$  mvts nucléons dans états individuels dans noyau  
⇒ 1 onde  $\equiv$  1 noyau dans 1 état quantique (global)  
⇒ Autant de configurations autant d'états...

# Schéma de niveaux noyaux sphériques impairs

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

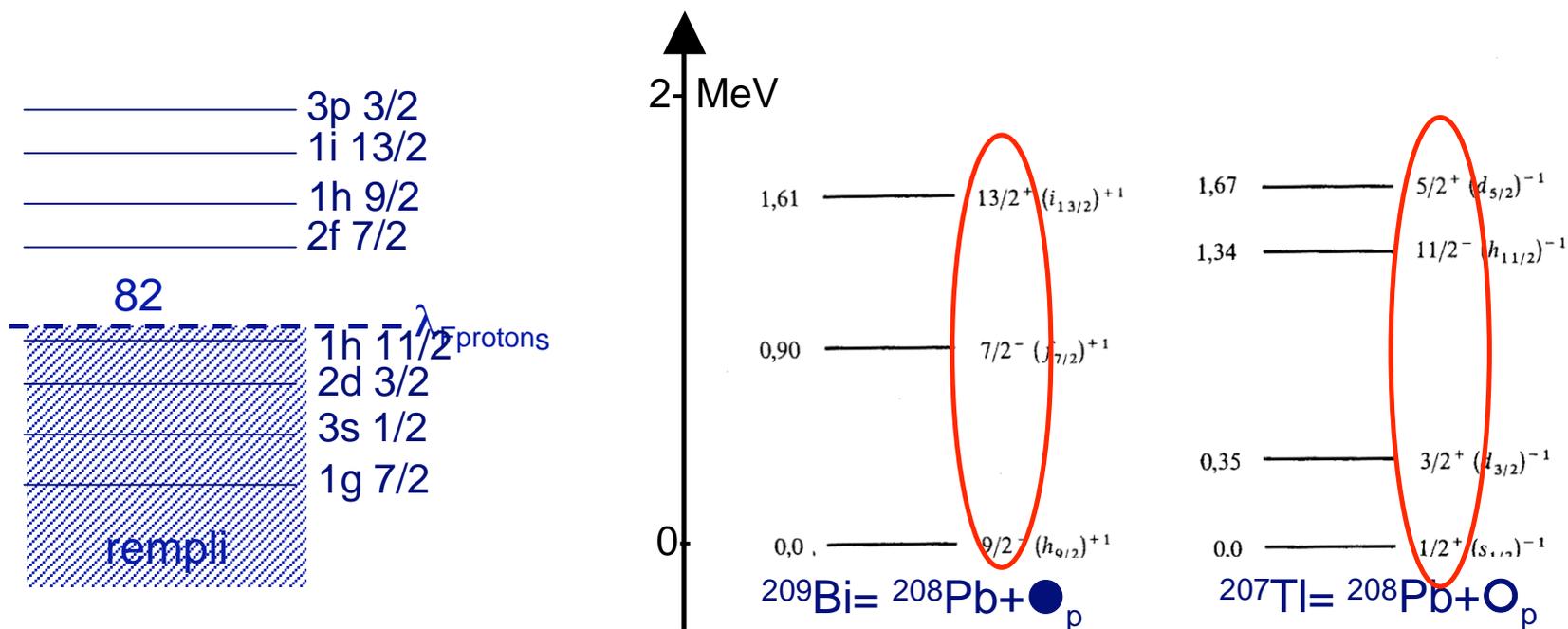
excitation  $\Leftrightarrow$   
 $\uparrow$  nucléon célibataire  
 $J_{\text{nucléon}} = J \text{ noyau}$

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



# Mais déjà en protons ça marche moins bien

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

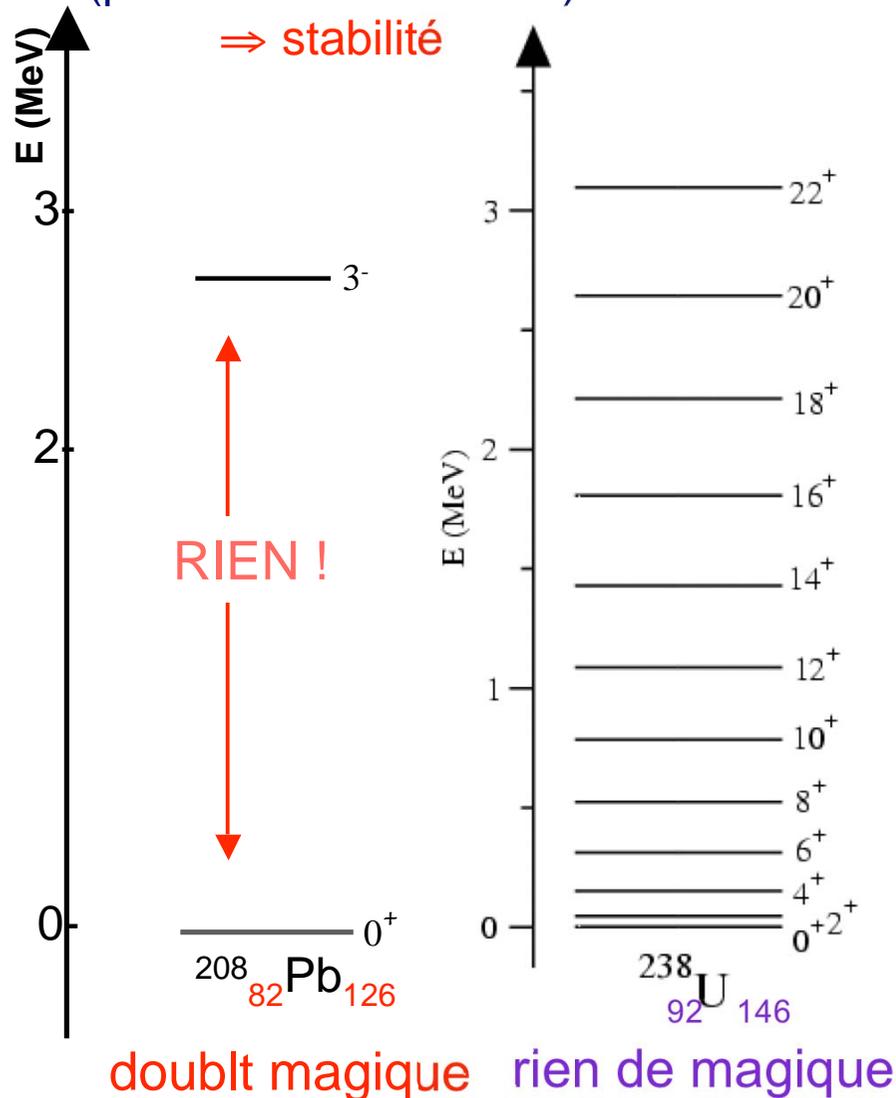


pas le bon ordre !!!!!

# Les noyaux magiques , de bons cœur : INERTES !

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

bcp d'énergie pour exciter  
(pour ébranler l'édifice)



**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  
= (noyau<sub>p-p</sub> + nucléon) + 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)

# Déformation : retour à la goutte liquide

1953 Bohr: Il s'agit d'une excitation de type rotation collective (et il y a aussi des vibrations collectives) comme dans les molécules

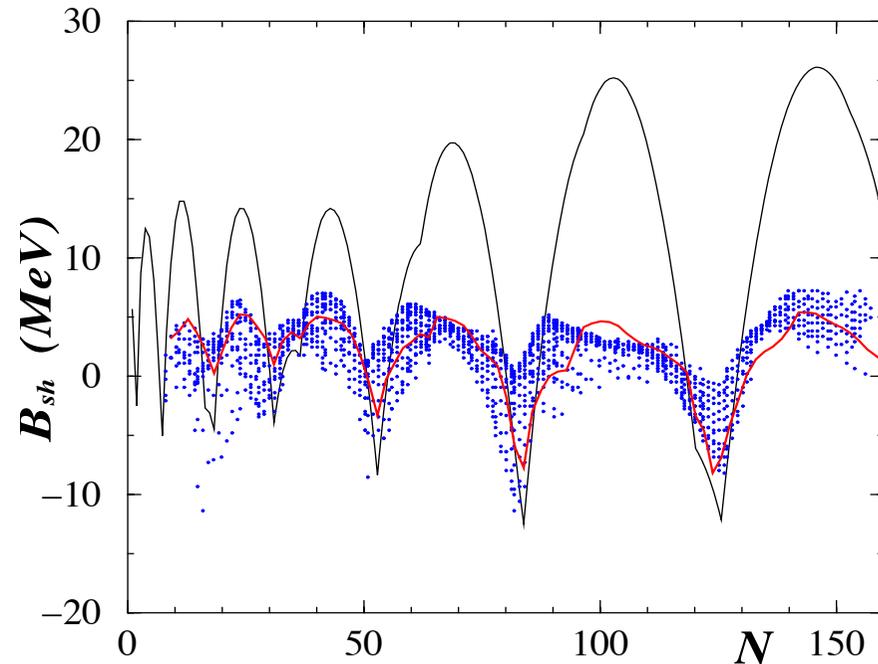
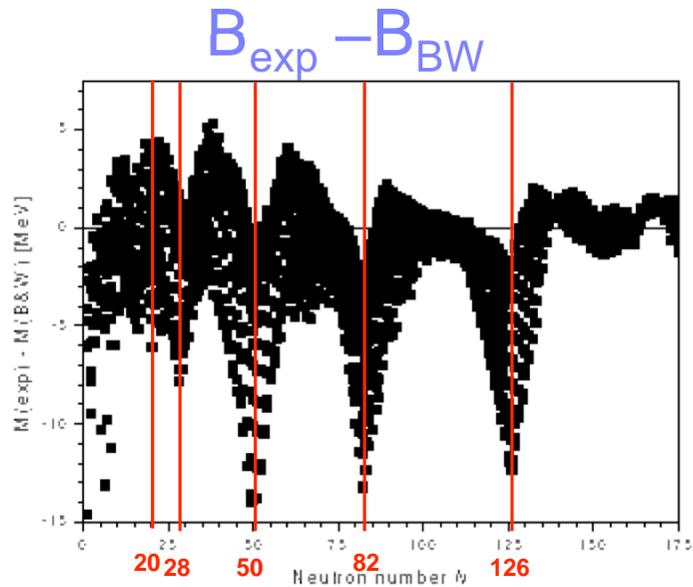
mais en **quantique rotation**  $\Leftrightarrow$  **déformation**

**origine:** oscillations de surface autour de la goutte liquide sphérique (incompressible)

**sphère**  $\Rightarrow$  **ellipsoïde** avec axe de symétrie (premier ordre non trivial)



# Déformation : retour à la goutte liquide

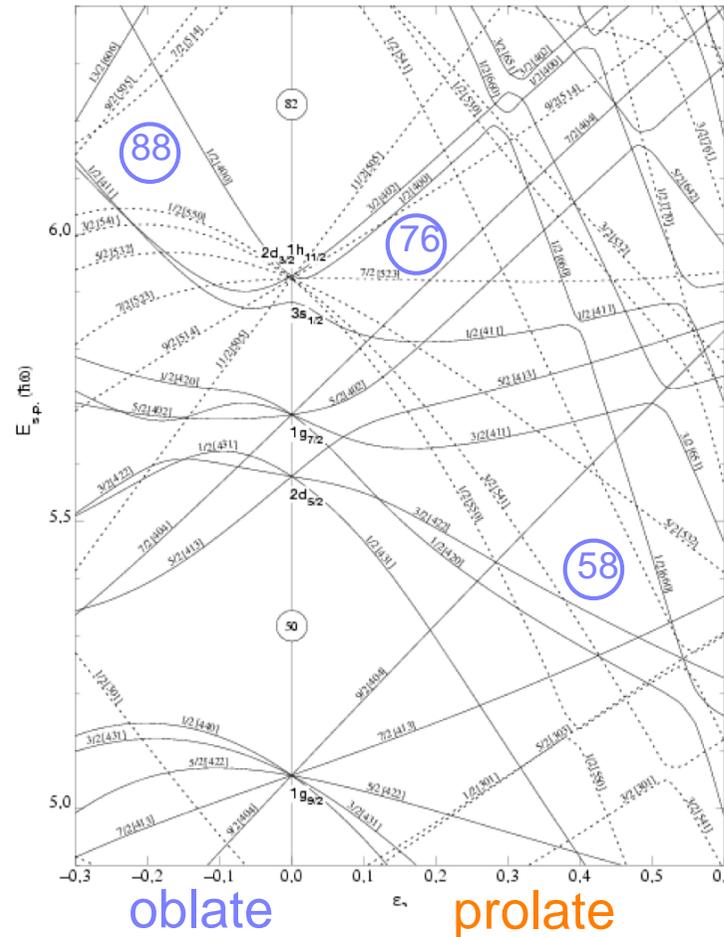
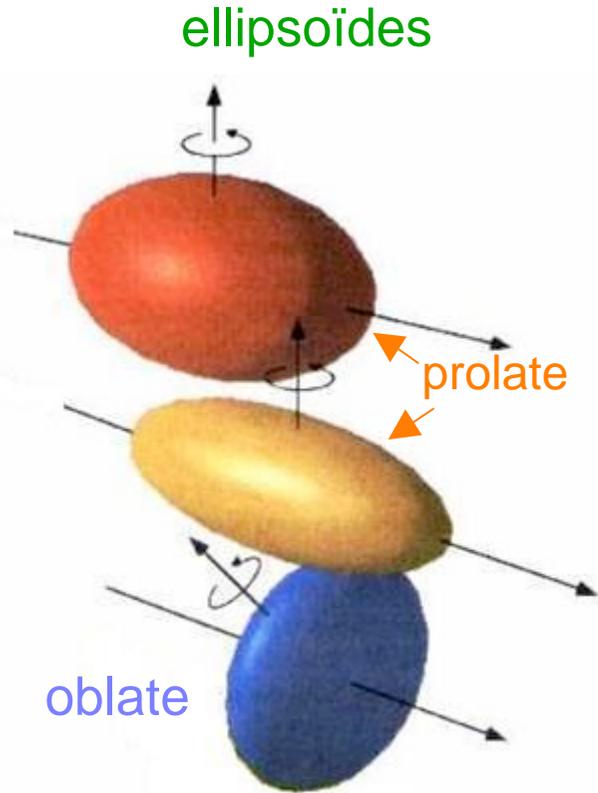


- calcul quantique puits sphérique
- “ ” puits déformé

⇒ il faut un modèle en couches pour des noyaux déformés ...

# Déformation : retour au modèle en couches

diagramme de Nilsson



sous-états  
magnétiques  
séparés  
( 2 nucléons par état)

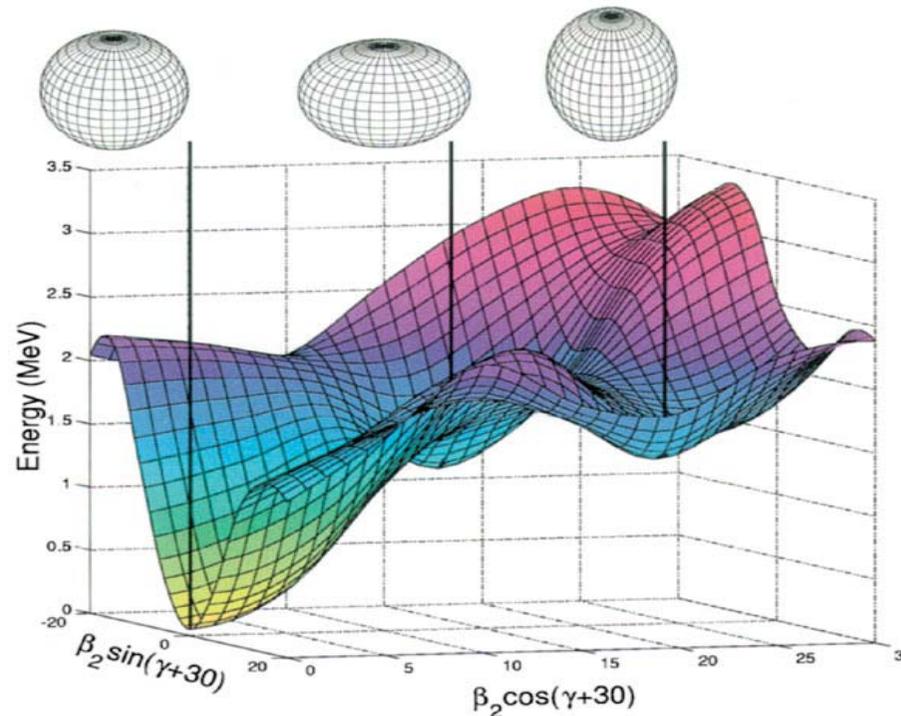
gaps : ⑩  
⇔ forme(s) stable(s)  
dans états et/ou  
excités

Osc. Harm différents sur chaque axe -  $D\ell$  + terme spin-orbite

# Coexistence de forme

Un noyau peut avoir plusieurs états  $J^\pi$  chacun associé à une forme différente  
Ici les 3 formes possibles de  $^{186}\text{Pb}$  (noyau pair-pair) donneront 3 états  $0^+$

Coexistence de forme  
dans  $^{186}\text{Pb}$   
Nature 405(2000)430



Plusieurs formes  $\Rightarrow$  plusieurs types d'excitation, plusieurs bandes....  
 $\Rightarrow$  ça se complique encore : dans les noyau impairs ou impair-impairs  
l'excitation individuelle peut se coupler à chaque excitation collective du cœur  
pair-pair (modèle unifié de Bohr 1953)...

# Enjeu théorique aujourd'hui: au-delà du puits de potentiel ad-hoc

## Succès de l'approximation du potentiel moyen

⇒ mais on utilise des méthodes plus fondamentales :

➔ construire LE potentiel moyen DE chaque noyau à partir d'une force « effective »  $V_{\text{eff}}$  entre deux nucléons (hyp : nucléons interagissent deux à deux) Les plus connues : forces de Skyrme, de Gogny phénoménologiques (pas dérivées de force nucléon-nucléon libres).

≈ 10 termes, poids de chacun calculé une fois pour toutes sur des noyaux stables.

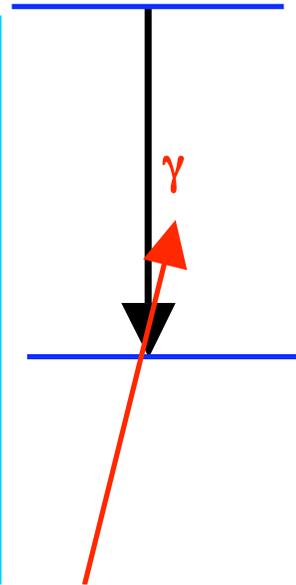
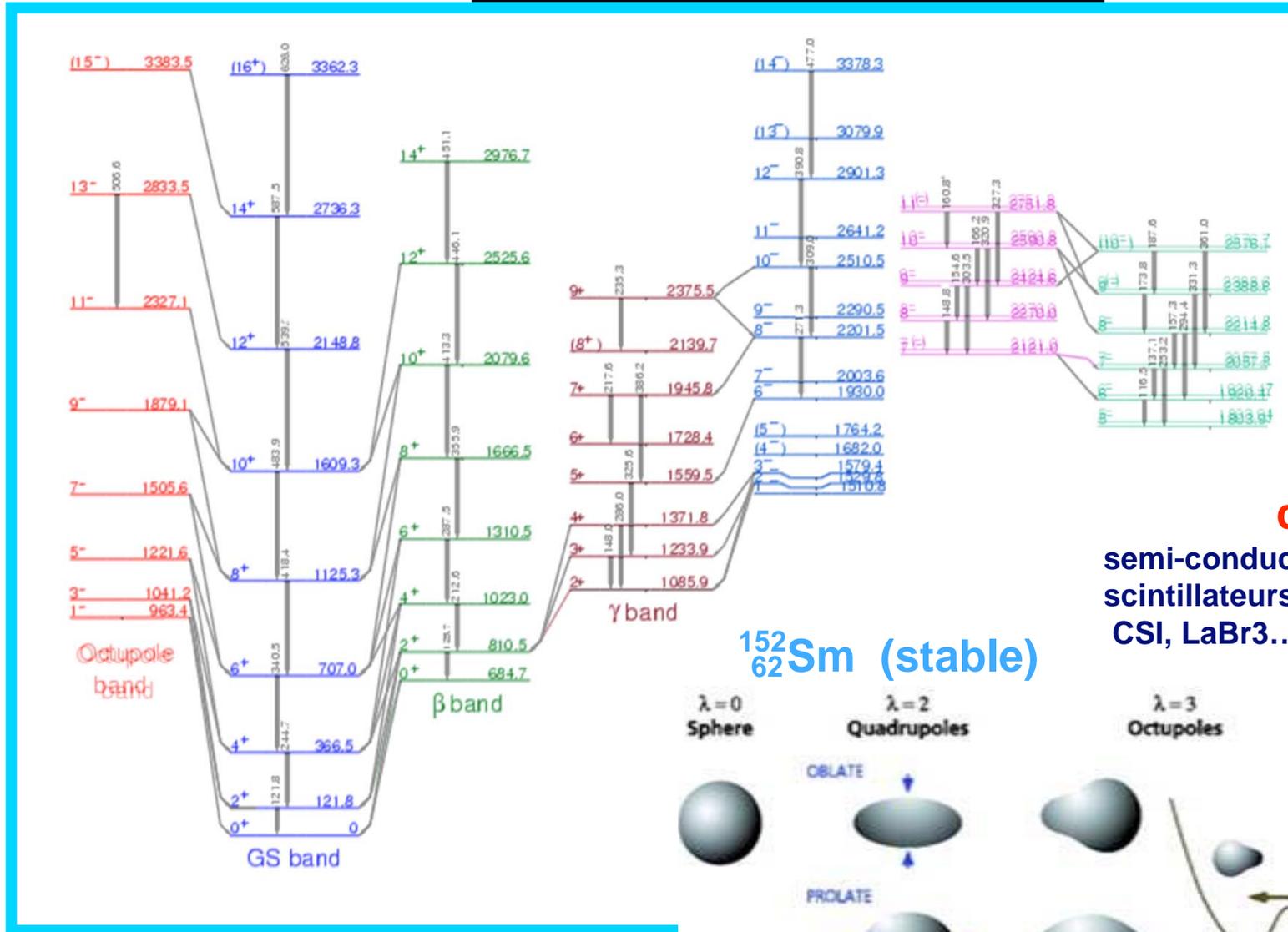
➔ noyau = cœur (magique) + particules “valence”

1<sup>er</sup> ordre (cœur) décrit par calcul précédent

2<sup>nd</sup> ordre: on calcule tous les termes nucléon<sub>valence</sub>-nucléon<sub>valence</sub> avec une force  $V_{\text{couches}}$  (4 types de force dont une effective car manque de données...)

↔ tester la validité, le pouvoir prédictif de ces forces  
loin de la stabilité...

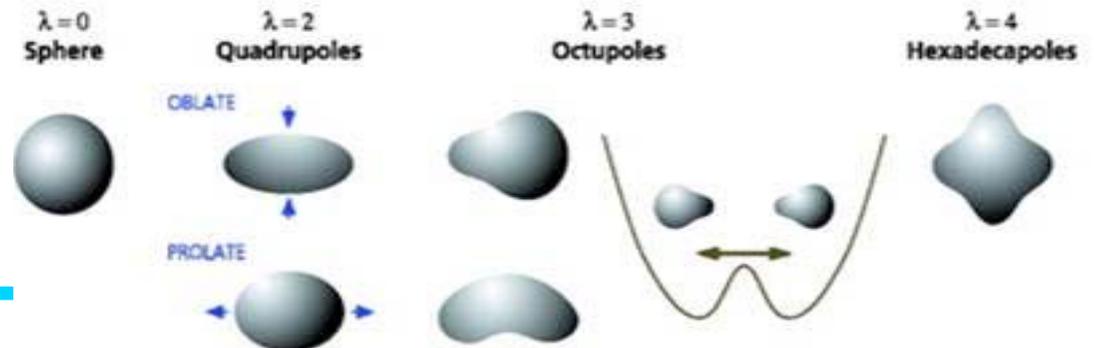
# transitions entre états



**déTECTABLE**

semi-conducteurs (Ge, CdTe, Si)  
scintillateurs (NaI, BGO, BaF<sub>2</sub>,  
CSI, LaBr<sub>3</sub>...)

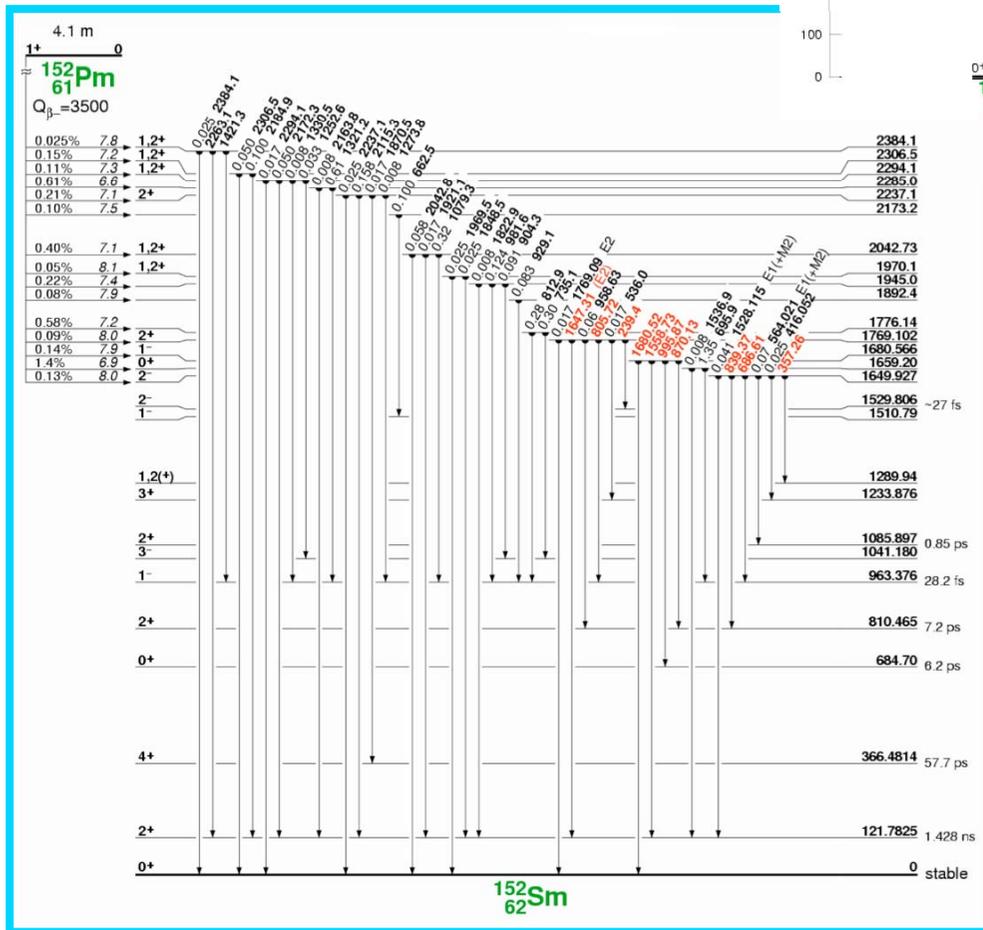
$^{152}_{62}\text{Sm}$  (stable)



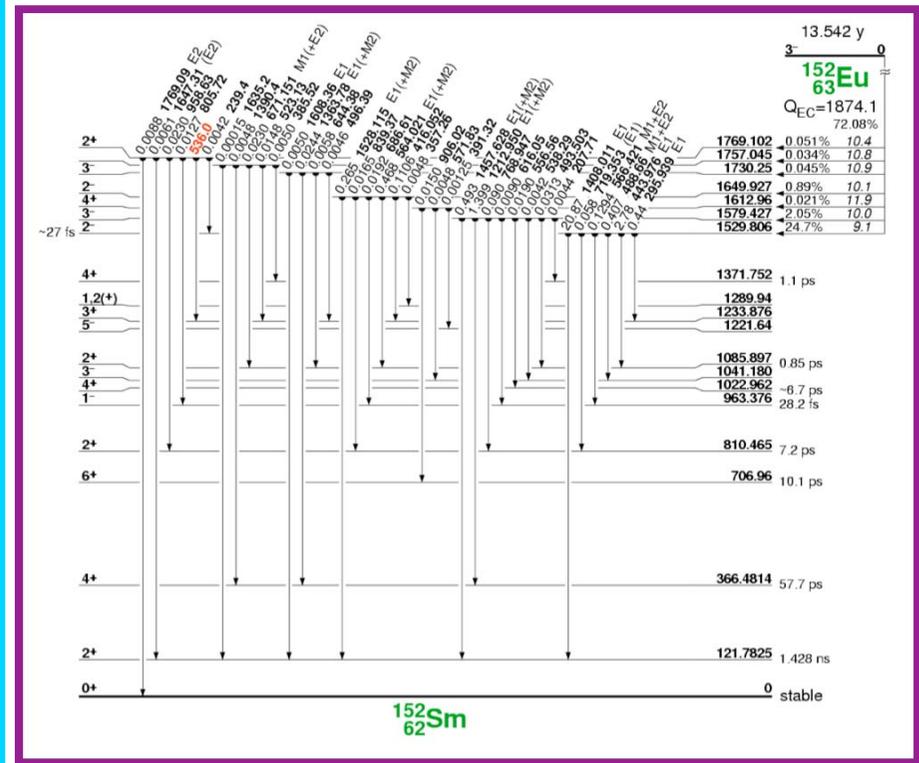
⇒ de multiples expériences sont nécessaires en faisceau

# Aussi en décroissance

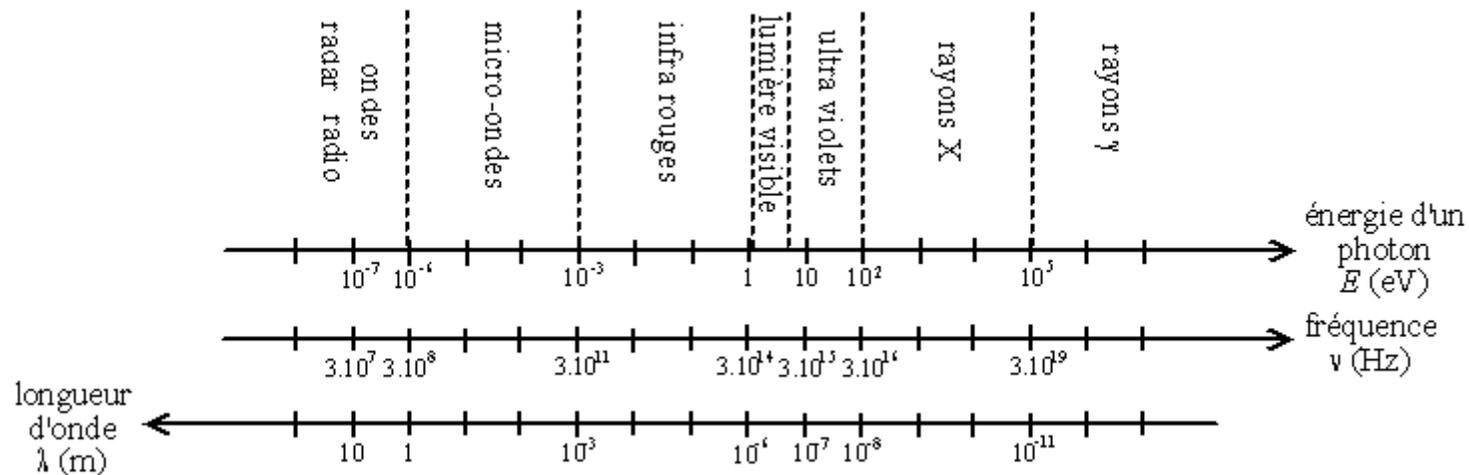
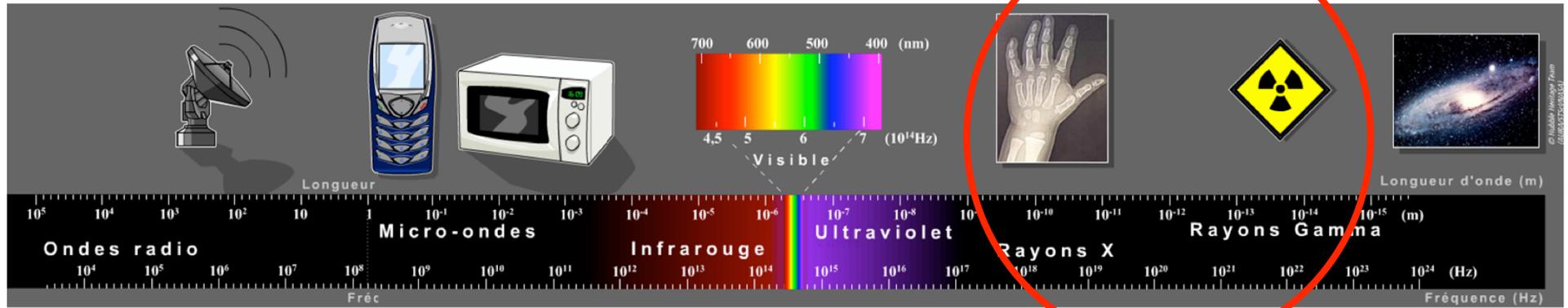
Partiel



Partiel



# spectre électromagnétique



sources: spectre électromagnétique couleurs à partir de [http://www.edumedia-sciences.com/a189\\_l1-spectre-electromagnetique.html](http://www.edumedia-sciences.com/a189_l1-spectre-electromagnetique.html)

échelles : [http://fr.wikipedia.org/wiki/Spectre\\_électromagnétique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Spectre_électromagnétique)

I. Deloncle, Fréjus 2008

Enjeu expérimental d'aujourd'hui :  
↔ créer ces noyaux dits exotiques  
car loin de la stabilité...

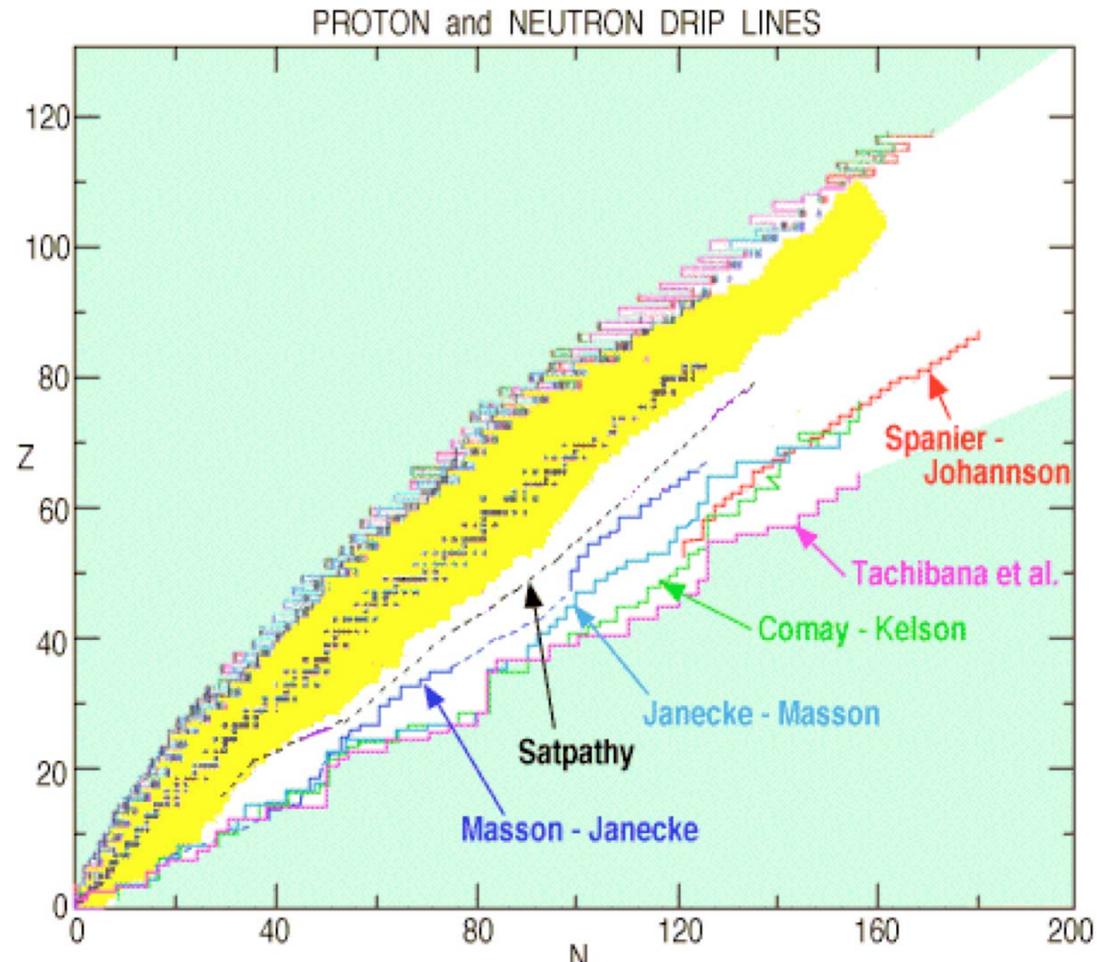


Fig. I.1: Chart of the nuclides showing the stable nuclei (dots), the region of known nuclei (yellow area), various dripline predictions [HA88] for both protons and neutrons, and the r-process path.

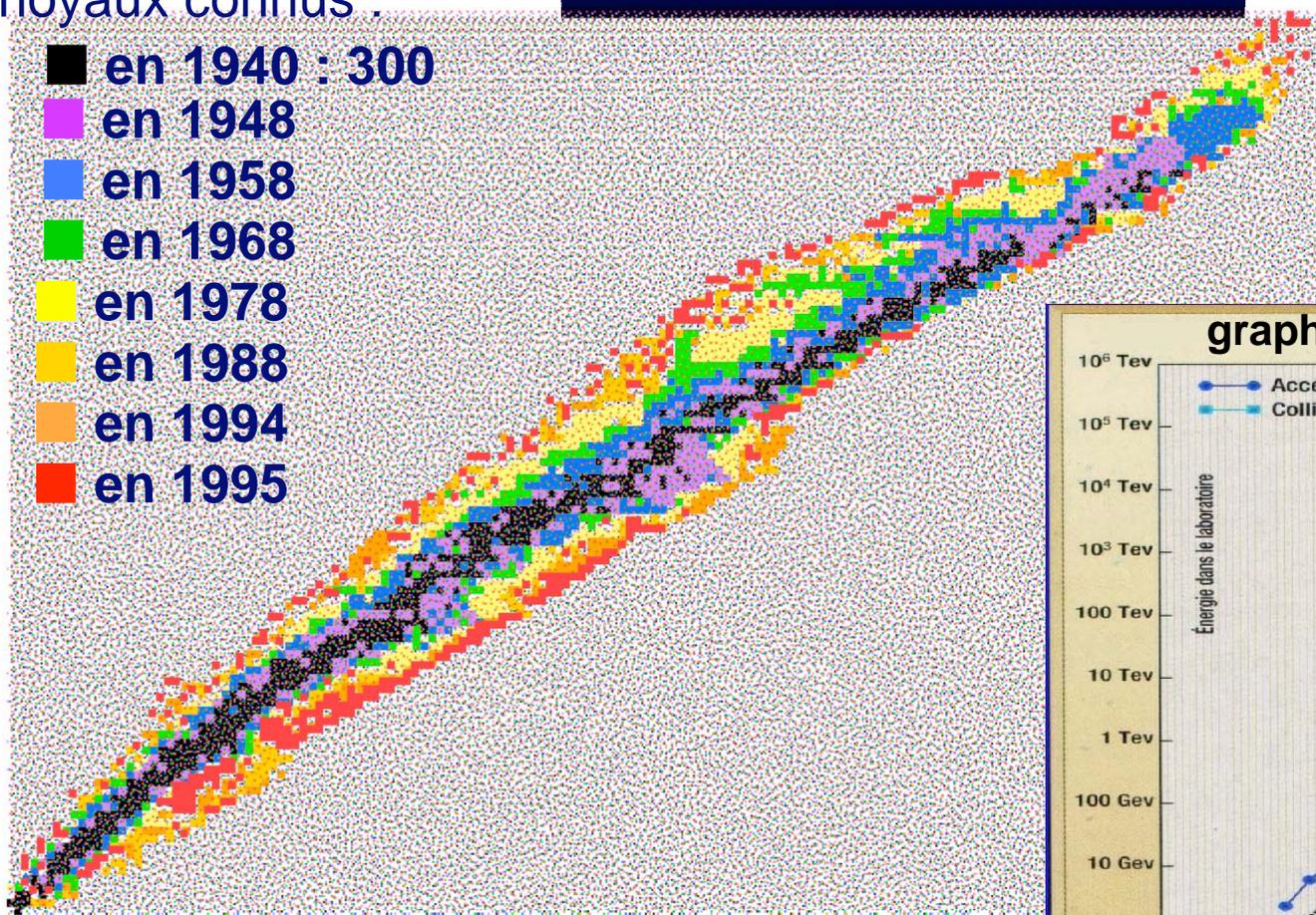
source : RIA 1995 Argonne Yellow Book <http://www.phy.anl.gov/div/origins/yellow-book/figsl.1-l.5.html>  
<http://www.sc.doe.gov/henp/np/nsac/docs/LRP1996.pdf>

Expériences :  
créer des noyaux  
loin des zones  
normalement peuplées

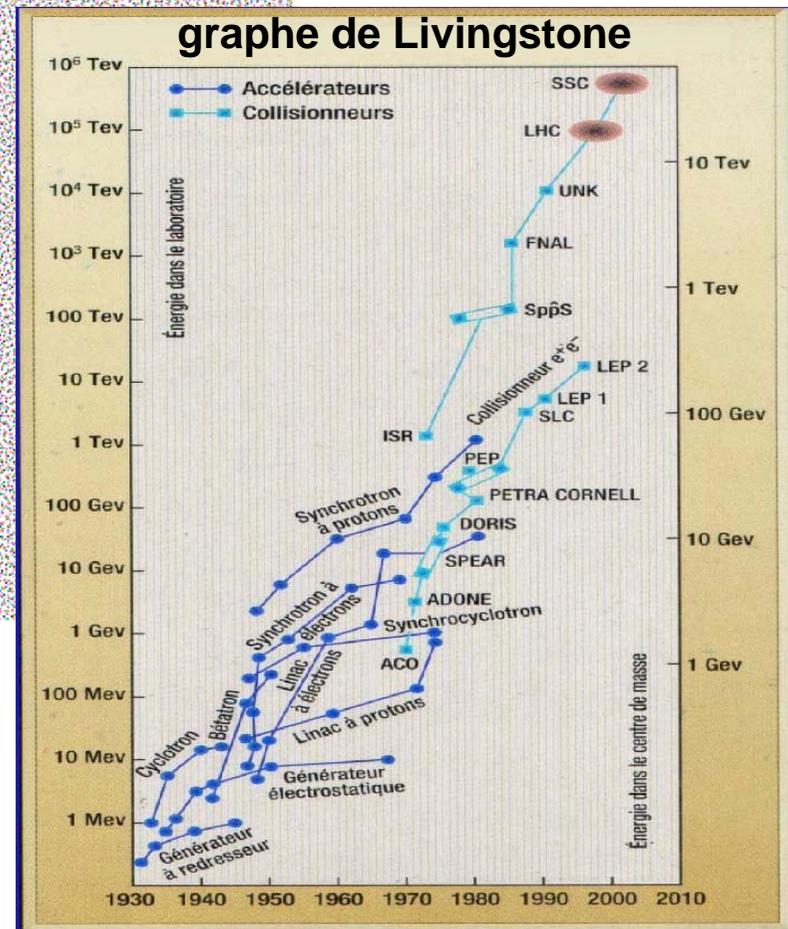
C'est très difficile :

noyaux connus :

- en 1940 : 300
- en 1948
- en 1958
- en 1968
- en 1978
- en 1988
- en 1994
- en 1995

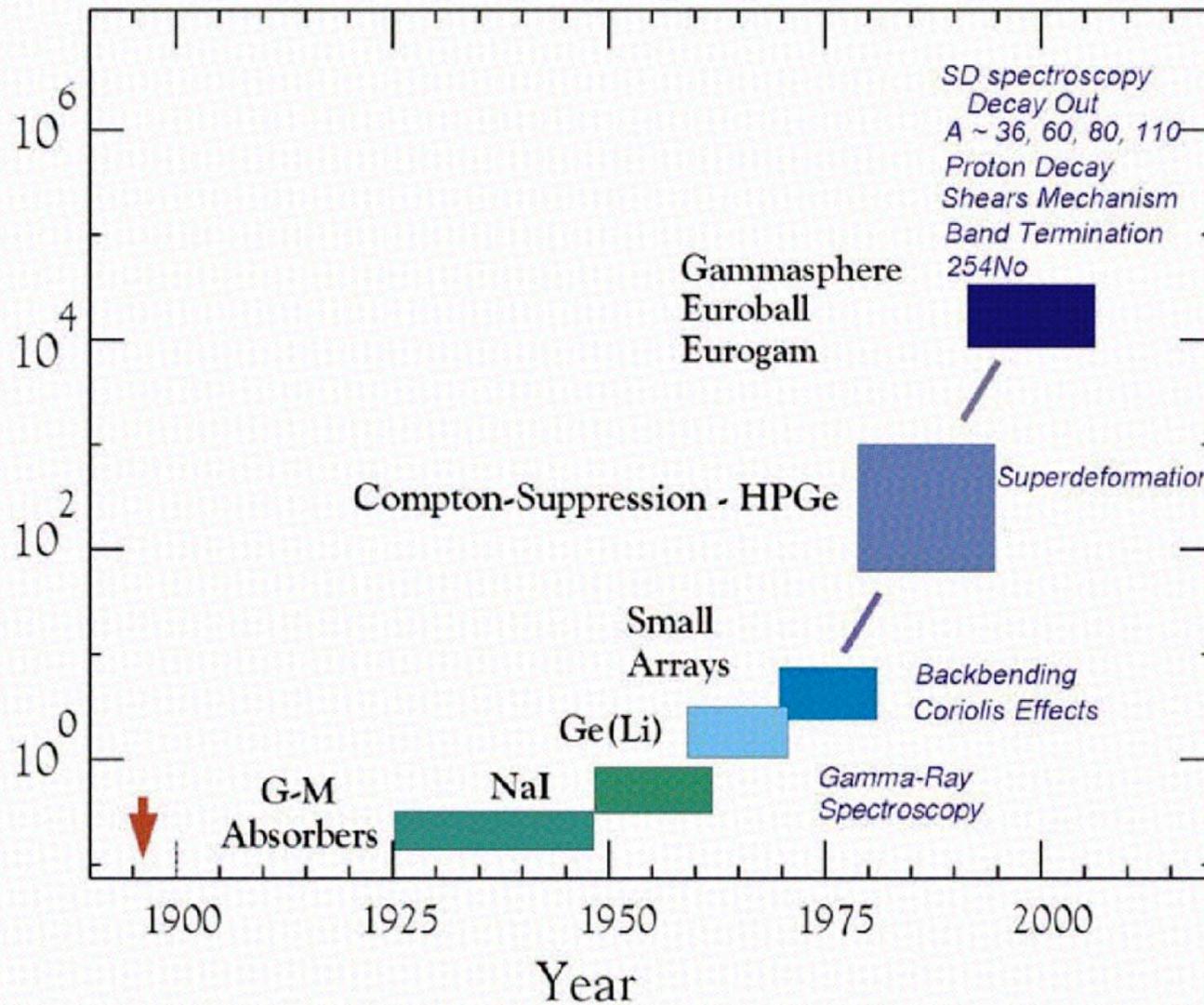


aujourd'hui ~3200  $\Rightarrow$   $\times 10$  en 60 ans  
 pourtant  
 gain énergie accélérateur  $\cong$   $\times 10$  tous les 10 ans



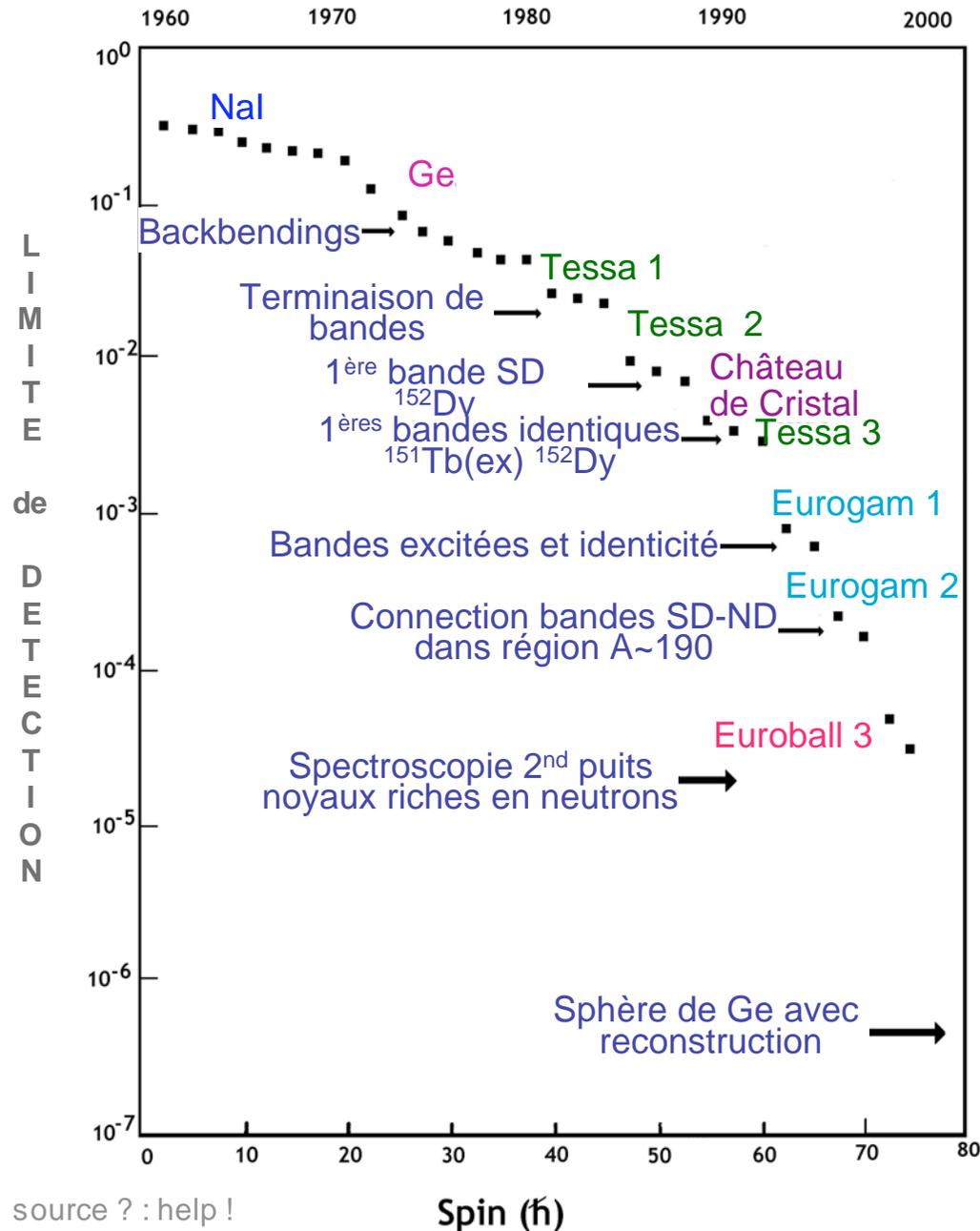
from C. Pagani A. Mueller  
 I. Deloncle, Fréjus 2008

# Malgré les avancées en détection...



gain en sensibilité des  
détecteurs gamma :  
Ge depuis 1970  
 $\sim \times 10$  par 10 ans

# Qui ont bien permis des découvertes



La raison tient aux moyens de produire les noyaux....  
Car on ne peut créer des noyaux qu'à partir de noyaux déjà existants....

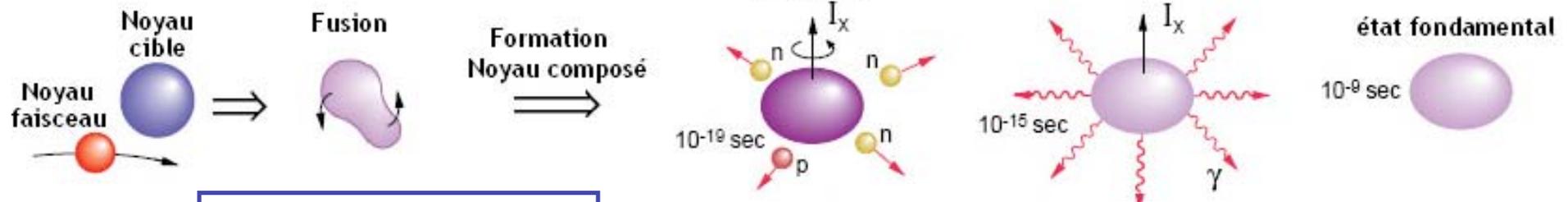
# Réactions à partir de noyaux stables...

## Fusion - évaporation

Réactions Ions lourds :

léger :  $N = Z$

+ lourd :  $N \gg Z$

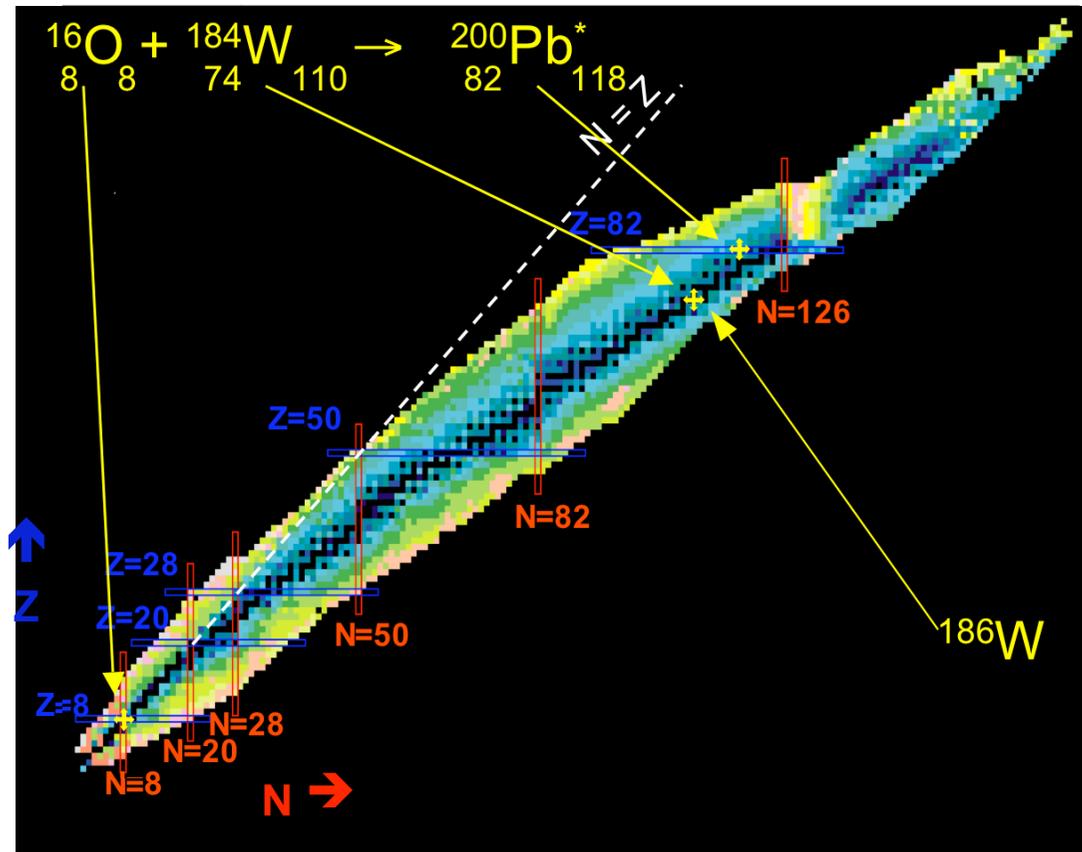


<p>noyau lourd + <math>\Sigma</math> nucléons <math>\Rightarrow N &gt; Z</math>  <math>\Rightarrow</math> côté déficients neutrons</p>	<p>Rotation <math>\Rightarrow</math> chemin des très grandes déformations: super, hyper- déformation          MAIS Evaporation de particules légères (p,n..) <math>\Rightarrow</math> déficients neutrons</p>	<p>moyen détection:  <math>\oplus</math> noyau de recul  <math>\oplus</math> particules légères  <math>\oplus \gamma</math></p>
--	---	---

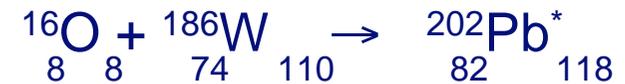


${}^{200}\text{Pb} \Rightarrow$  côté déficients neutrons:  ${}^{206}\text{Pb}$  dernier isotope stable (donc abondant)  
 période du  ${}^{204}\text{Pb}$  (1,4% du Pb sur Terre)  $\sim 10^{17}$  ans (âge Terre  $4,6 \cdot 10^9$  ans)

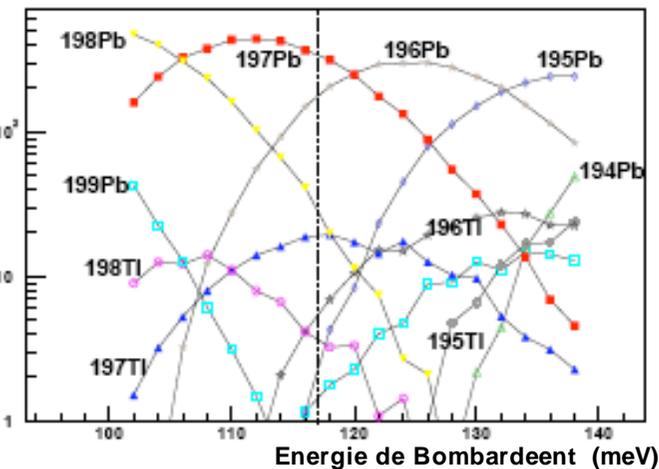
# Fusion-évaporation de noyaux stables...



on peut parfois jouer sur  
autres isotopes stables ici  $^{186}\text{W}$



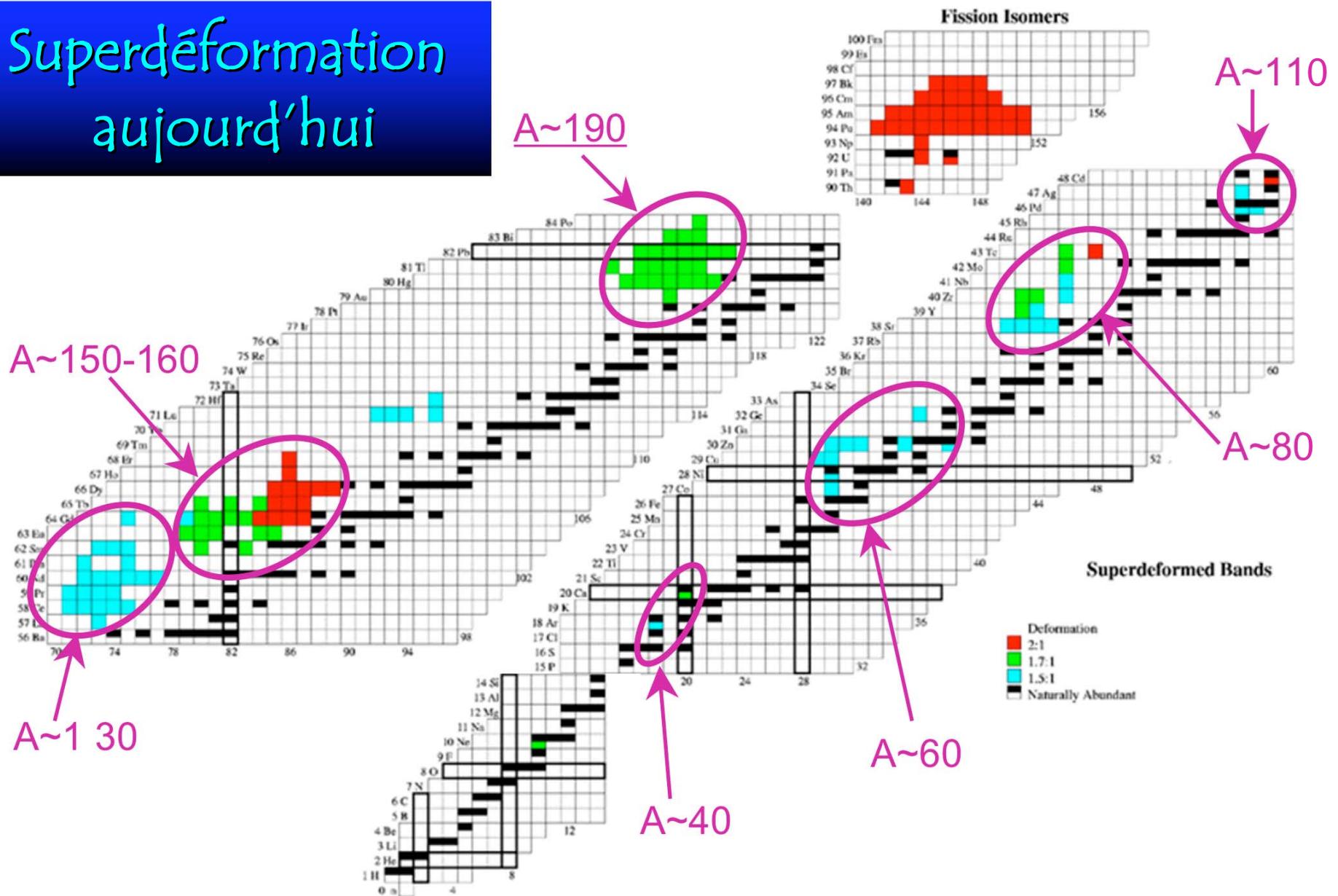
probabilité de production calculée (mb)



$E_{\text{beam}} \sim 120 \text{ MeV}$  soit  $\sim 8 \text{ MeV/u}$   
jouer sur l'énergie,  
ou perfectionner les détecteurs  
pour sélectionner des voies rares...

Il n'en demeure pas moins que  $\Rightarrow$

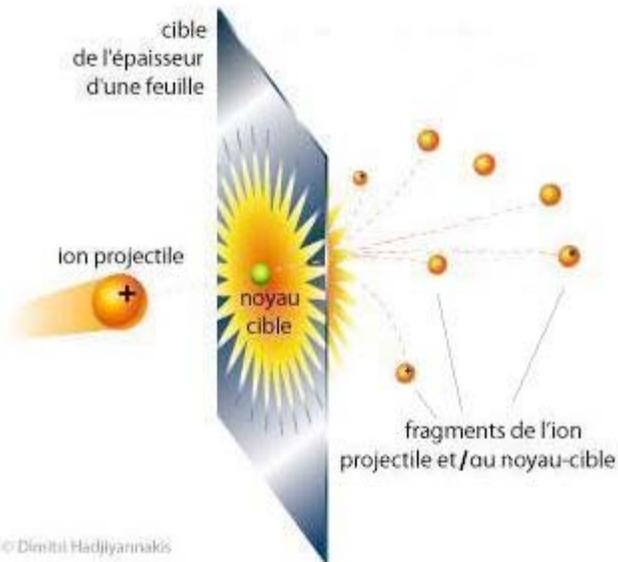
# Superdéformation aujourd'hui



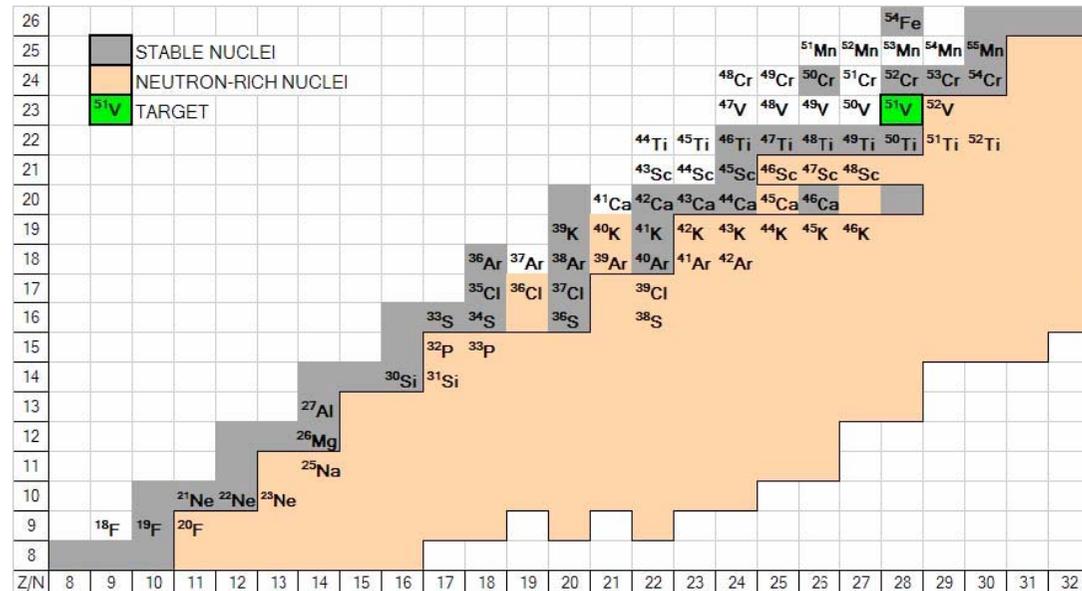
Pourtant, il y a toutes les raisons de penser qu'il y en a autant de l'autre côté de la vallée ...

# Fragmentation

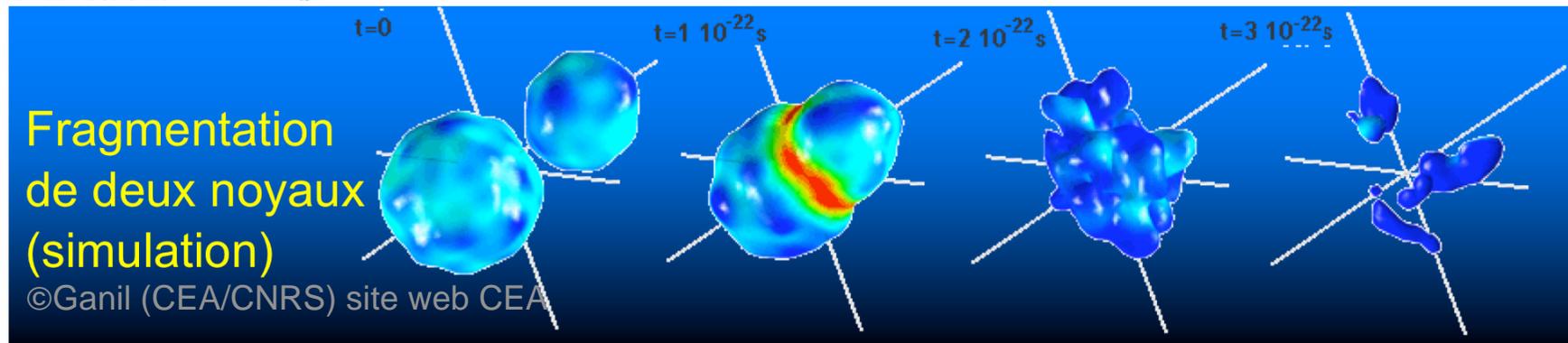
ion léger + haute énergie que fusion-évaporation : qqs dizaine MeV/u au GeV  
 $\Rightarrow E_{\text{faisceau}} > B/A$  (énergie de liaison moyenne par nucléon  $\sim 8$  MeV)  
 $\Leftrightarrow$  pas de noyau composé : on attaque la structure quantique,  
 “chauffe” le noyau



Fragments de la cible de  $^{51}\text{V}$  sous faisceau de  $^{12}\text{C}$  (30MeV/A)



<http://repositories.cdlib.org/cgi/viewcontent.cgi?article=2468&context=ibn>



[http://www.cea.fr/fr/magazine/dossier\\_noyau/chapitre4.htm](http://www.cea.fr/fr/magazine/dossier_noyau/chapitre4.htm) : lien cassé

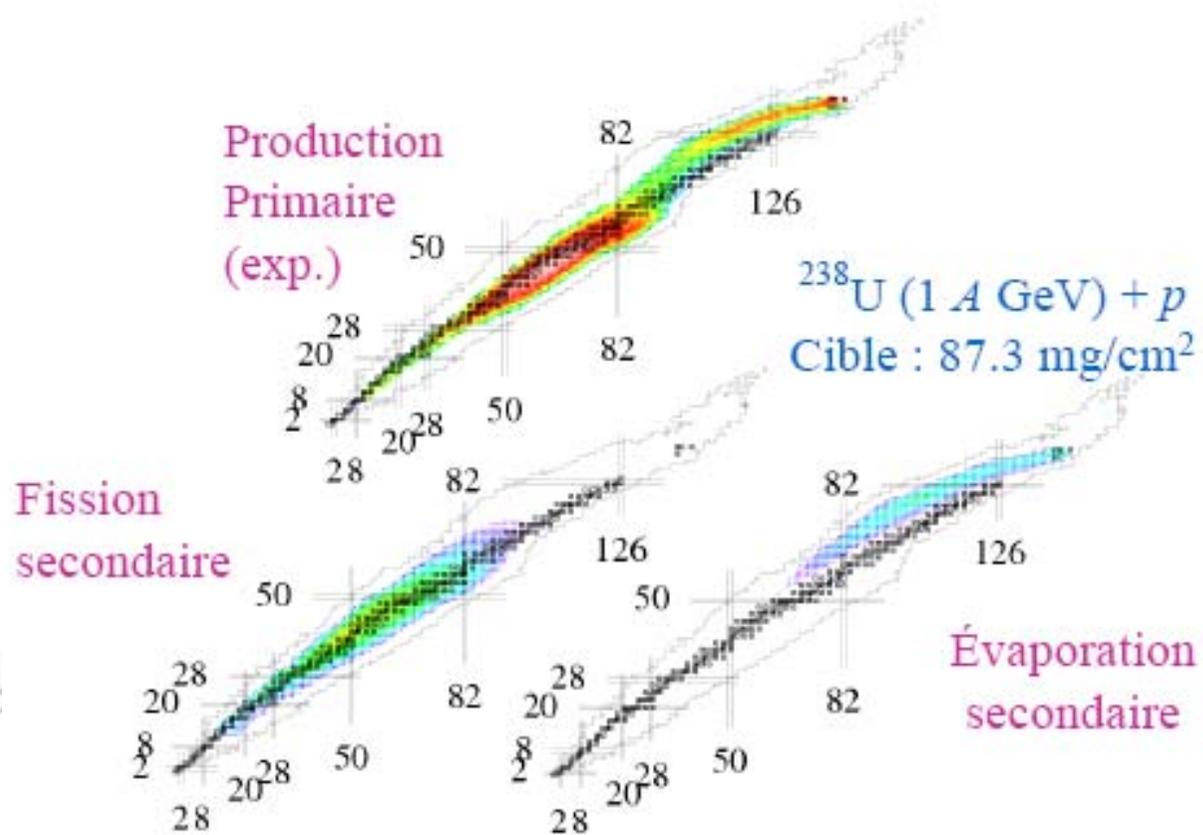
[http://www.cea.fr/fr/magazine/dossier\\_noyau/img/simulationFragNoya\\_vignette.gif](http://www.cea.fr/fr/magazine/dossier_noyau/img/simulationFragNoya_vignette.gif) : lien cassé

# Spallation

p (n) encore plus d'énergie : de qqs 100 MeV au GeV

⇒ **billard interne** (cascade intranucléaire) des nucléons sont éjectés

⇒ il reste un noyau encore très excité qui peut fissionner si fissile



source image mécanisme spallation : [http://hp.ujf.cas.cz/ionty/adtt/uvod/uvoden\\_soubory/image003.gif](http://hp.ujf.cas.cz/ionty/adtt/uvod/uvoden_soubory/image003.gif)

U + p total : [http://www.in2p3.fr/recherche/nouvelles\\_scientifiques/archives/2005/1\\_spallation.htm](http://www.in2p3.fr/recherche/nouvelles_scientifiques/archives/2005/1_spallation.htm)

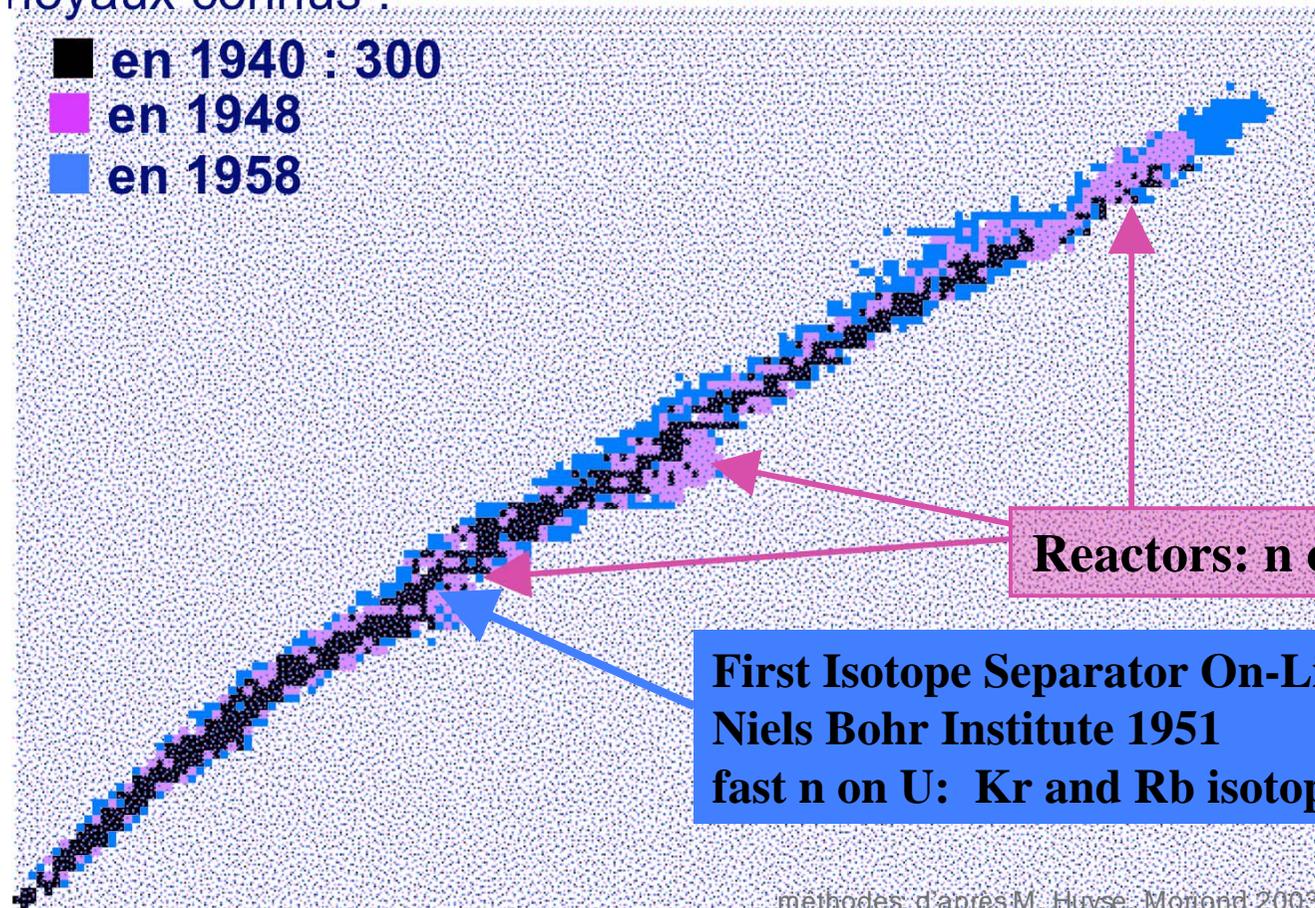
décomposition <http://www.qanil.fr/research/events/seminars/files/2005/Presentation-P.Napolitani.pdf>

# Fission induite par particule:

(utilisée depuis longtemps)

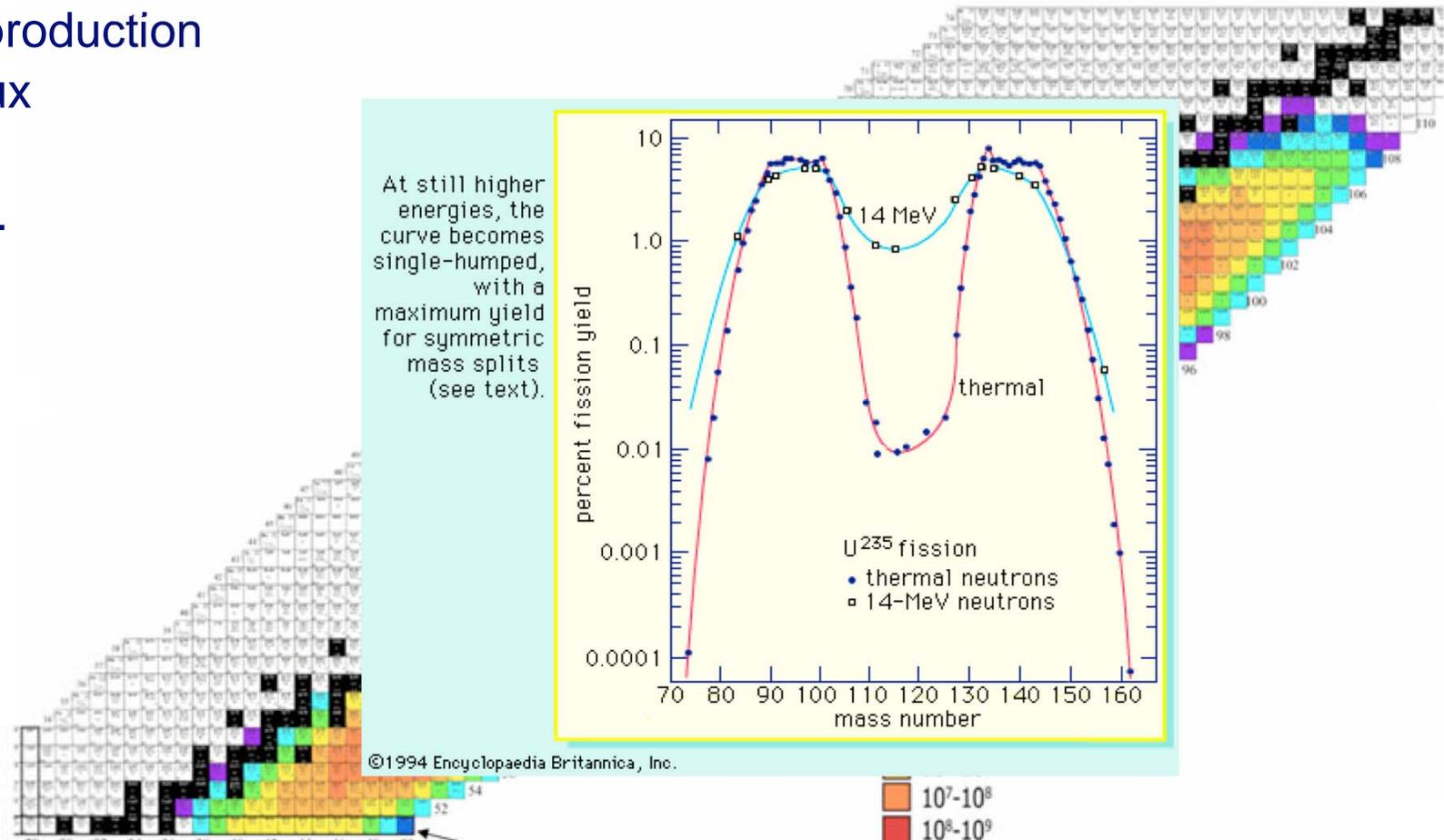
Parmi premiers noyaux synthétiques : neutrons des réacteurs sur cible U  
Fission **Induite** pour ne pas attendre le bon vouloir d'un noyau qui fissionne  
"spontanément")

noyaux connus :



# Fission induite

**INDUITE :**  
en plus production  
de noyaux  
entre les  
bosses...



**Fission, Fragmentation, spallation : beaucoup de noyaux à la fois  
⇒ séparation et/ou détection ultra performante indispensable  
pour retrouver nos petits.**

# Ex: fission induite par ions lourds

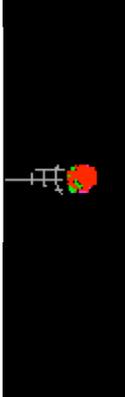
## pré fission

cible:



ralentissement dans support de cible (Au) évacuation du trop plein d'énergie, évaporation de neutrons

**INSUFFISANT!**



projectile:

ion lourd



noyau composé

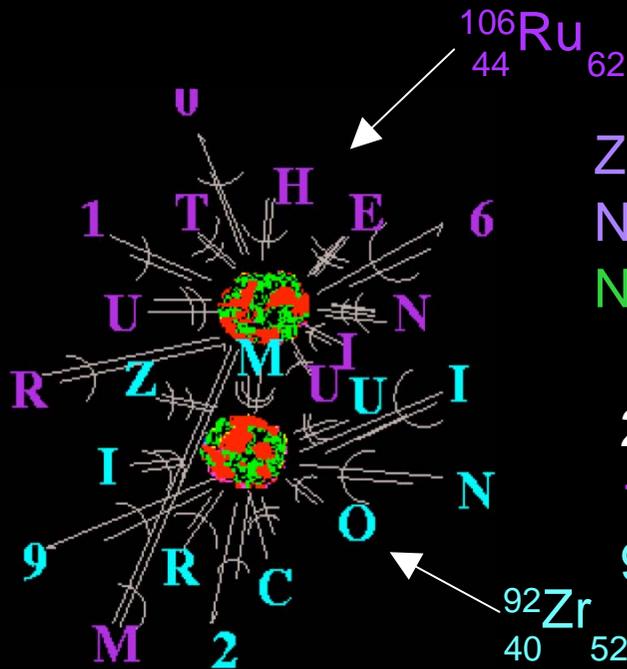
fissile essayant de trouver un équilibre qui n'existe pas

fission  $\Rightarrow$  deux noyaux évacuant leur énergie avec des neutrons

puis par des **gammas** émis en cascades **à l'arrêt**

Chaque cascade de  $\gamma$  émise par chaque fragment crée à haut moment angulaire est unique

# Détection de cascades de photons



$$Z_1 + Z_2 = 44 + 40 = 84 = Z_{P_0}$$

$$N_1 + N_2 = 62 + 52 = 114 (\neq 120) = N - N_{\text{évap}}$$

$$N_{\text{évap}} = 6 (\langle N_{\text{évap}} \rangle = 4 \pm 2)$$

2 cascades de gamma :

106RUTHENIUM

si détectés R I U M

92ZIRCONIUM

⇒ pas de reconnaissance

⇒

Il faut détecter un maximum de photons pour avoir une chance de séparer et d'identifier les deux noyaux produits.

⇒ possible avec les plus performants des multi détecteurs de  $\gamma$  tels EUROBALL IV (détecteur européen, à Legnaro puis à Strasbourg auprès du vivitron)

# Détection de cascades de photons



239 cristaux  
de Germanium

# Analyse des événements

Plus d'un demi milliard d'événements de 'fold' 3 et plus:

1 évt de fold 3 : 

$E_{\gamma_1}$	$E_{\gamma_2}$	$E_{\gamma_3}$
----------------	----------------	----------------

 3 gammas ont été détectés en coïncidence  
(~200ns)

⇒ Nécessité de programmes d'analyse pour "interroger" les données:

-Q: Avec quelles autres énergies  $E_{\gamma_1}$  a-t-elle été vue ?

-R : le plus souvent avec  $E_{\gamma_2}$

-Q: Avec quelles autres énergies  $E_{\gamma_1}$  et  $E_{\gamma_2}$  ensemble ont-elles été vues ?

-R : le plus souvent avec  $E_{\gamma_6}$

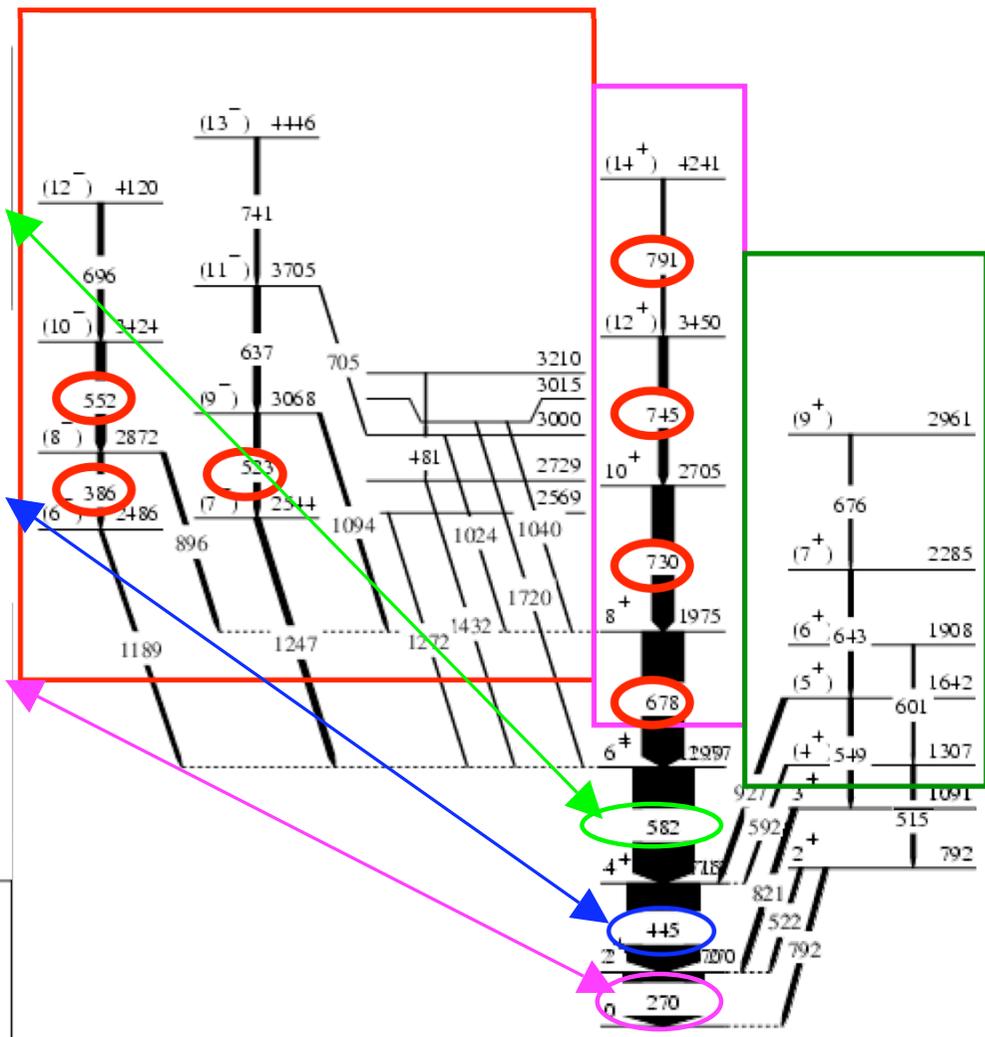
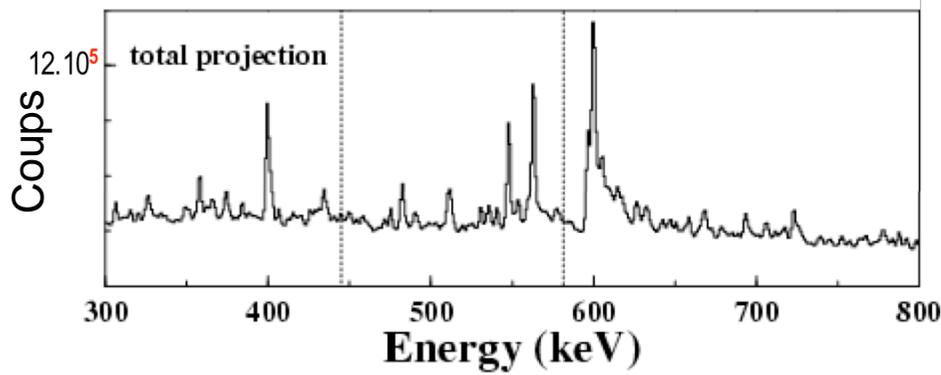
-Q: Avec quelles autres énergies  $E_{\gamma_1}$  et  $E_{\gamma_6}$  ensemble ont-elles été vues ?

-R : le plus souvent avec  $E_{\gamma_9}$

etc...

jusqu'à ce que toutes les transitions suffisamment intenses aient toutes été placées

# Résultat d'un questionnaire



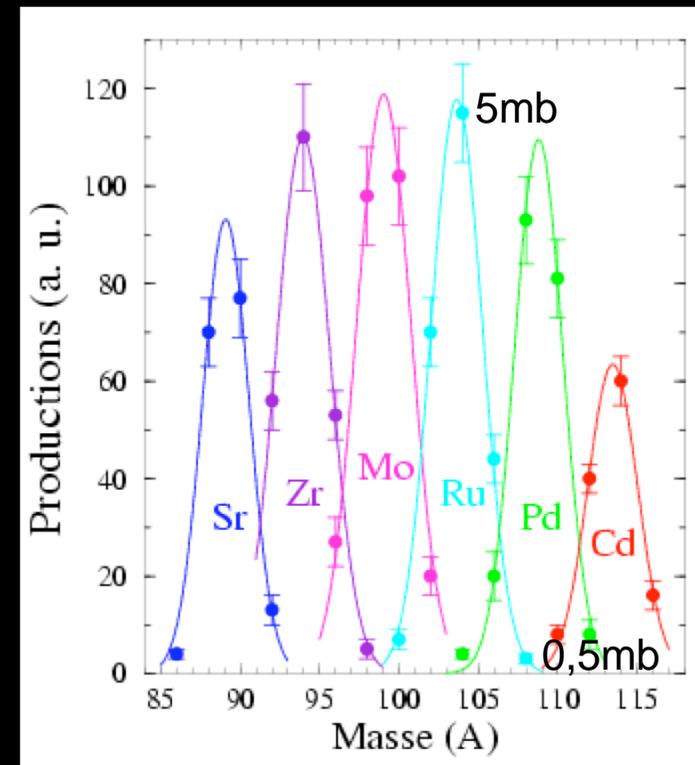
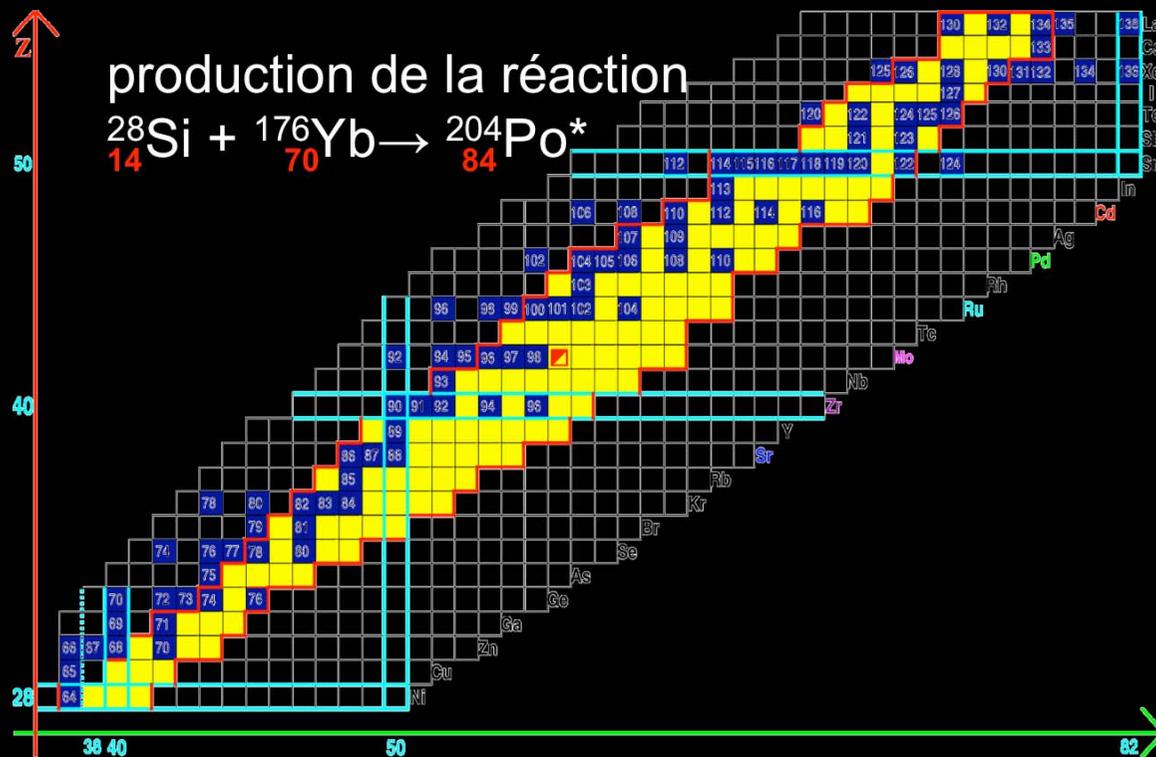
$^{106}\text{Ru}$   $\sigma \sim 2\text{mb}$   
 départ: 5 niveaux connus

# Fission induite par ions lourds:

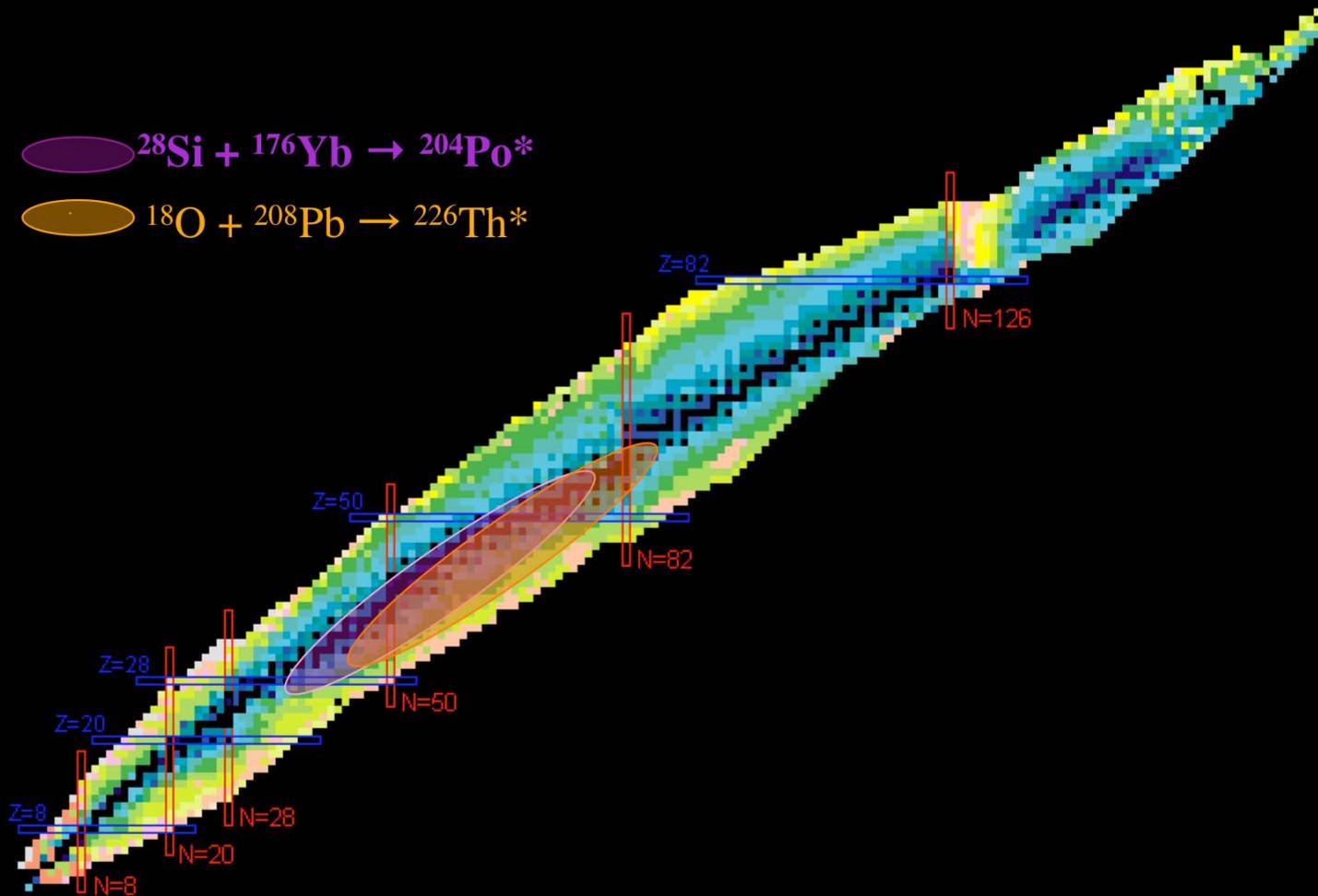
1 transition mène à tous, deux transitions à un noyau, 3 au 1<sup>er</sup> embranchement

- le + d'événements de fold élevés possible  $\Rightarrow$  granularité et efficacité
- séparer des transitions très proches en énergie  $\Rightarrow$  bonne résolution
- le moins de fond possible  $\Rightarrow$  bon rapport Pic/Total

+ de 100 noyaux produits à assez haut spin



# Variation de la zone de production

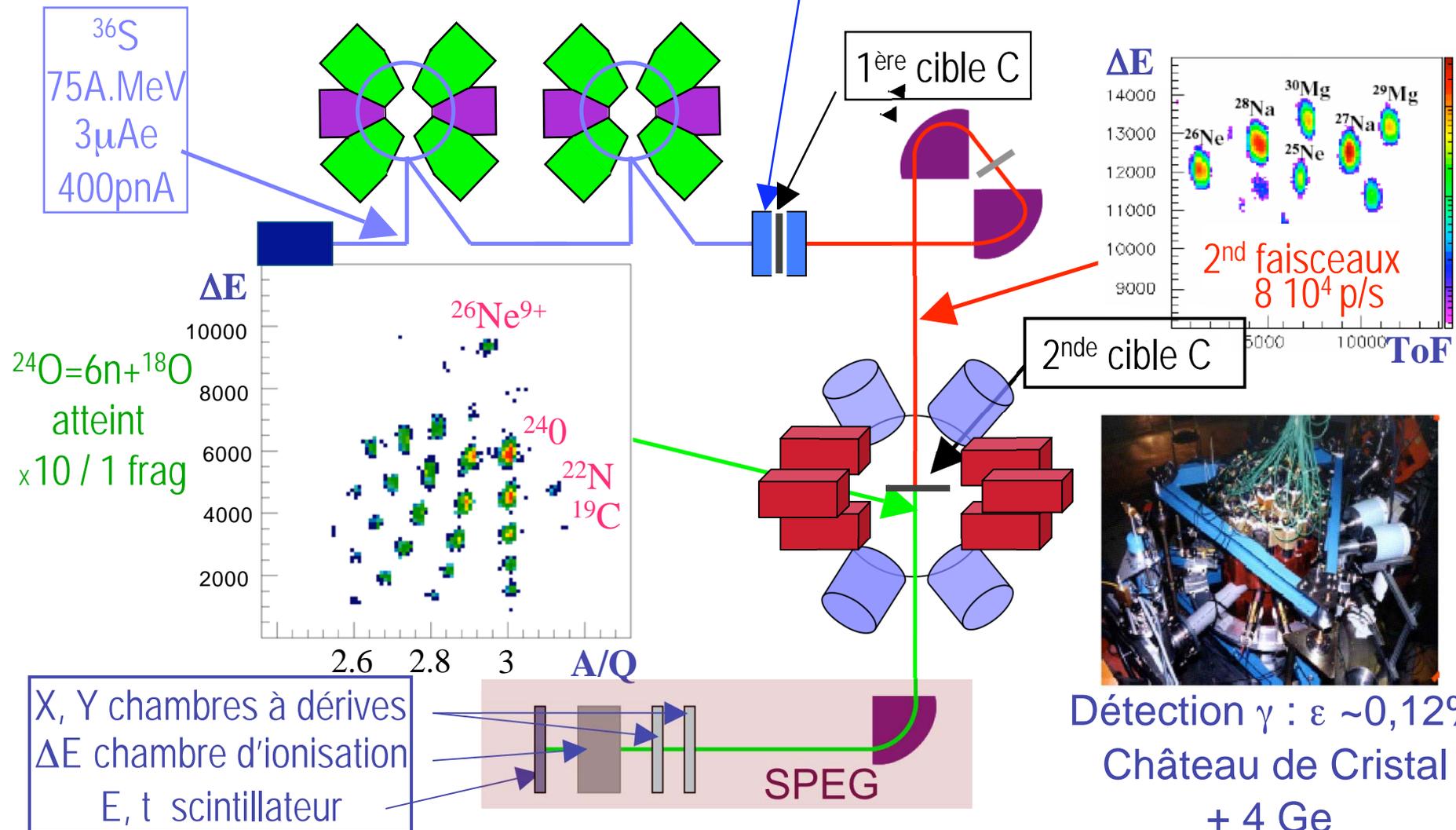


# Faire des réactions avec les noyaux produits

Deux étapes de fragmentation

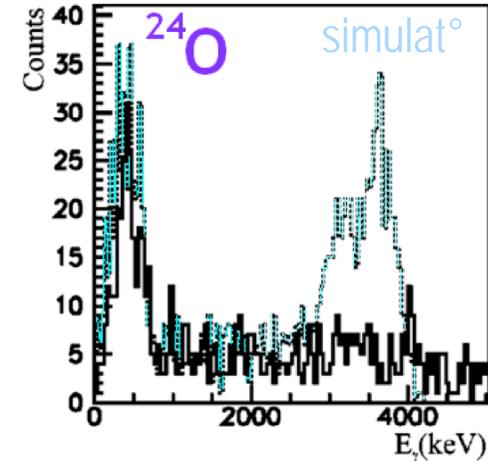
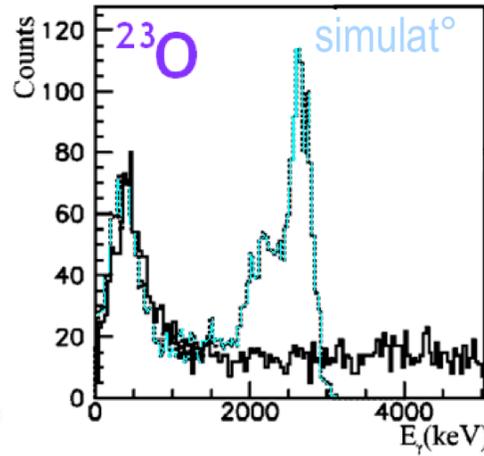
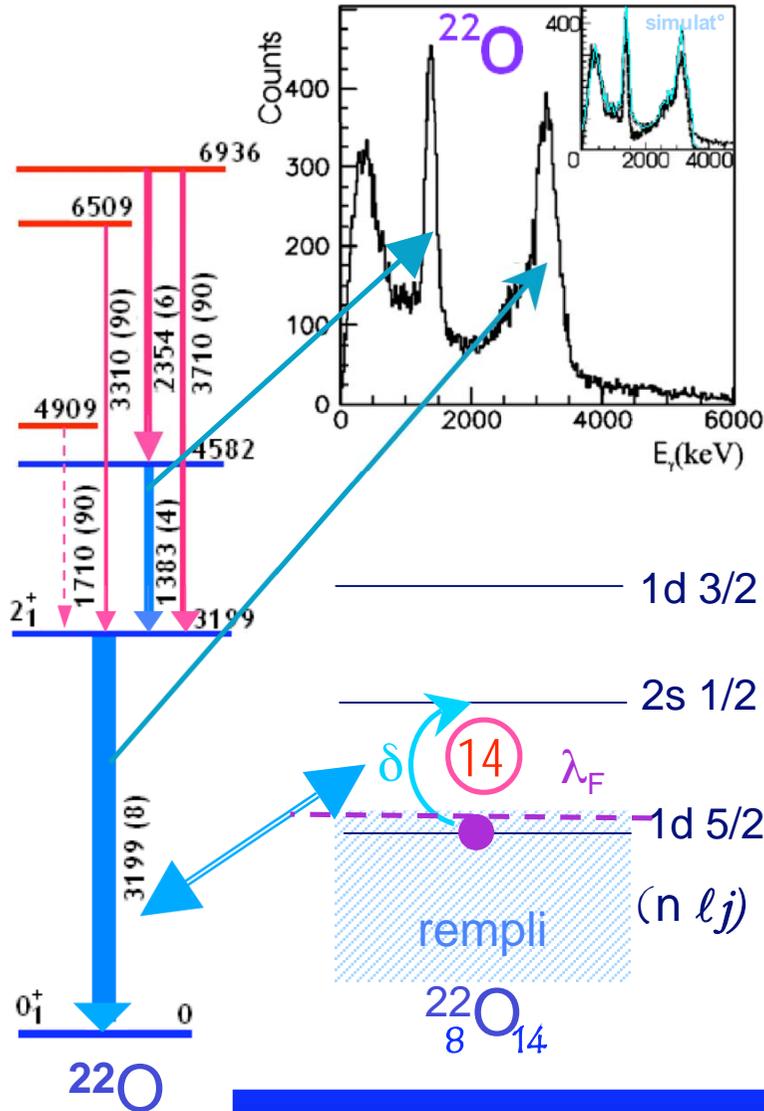
M. Stanoiu et al., Phys.Rev. C69, 034312 (2004)

SISSI : source d'ions secondaires à supraconducteurs intenses



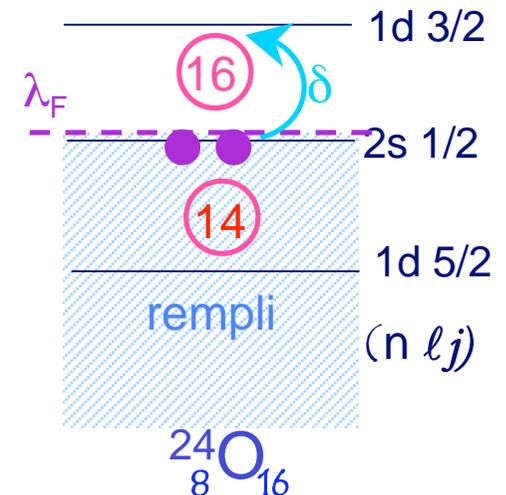
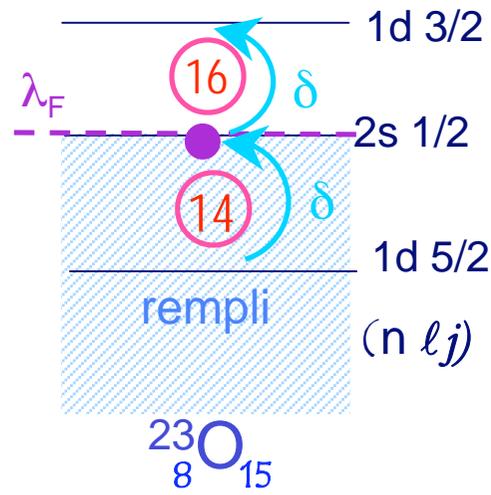
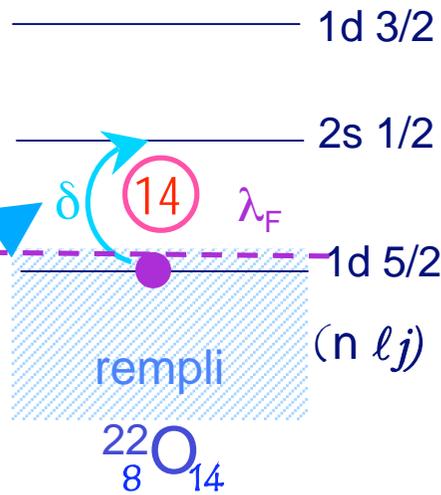
# Résultats en $\gamma$ pour $^{23,24}_{8}\text{O}_{15,16}$

M. Stanoiu et al., Phys.Rev. C69, 034312 (2004)

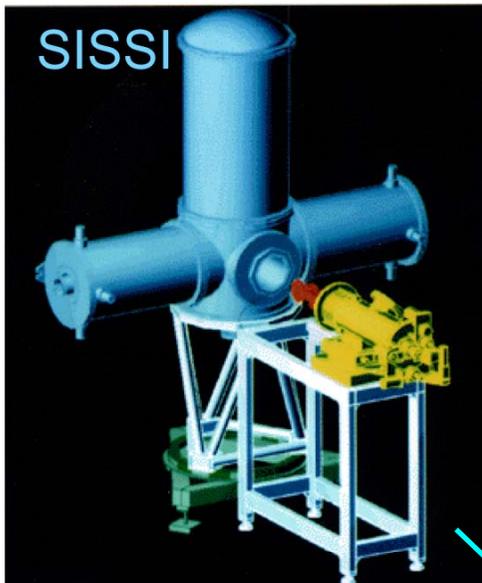


rien  $\Rightarrow \delta \sim E > S_n = 2,7\text{MeV}$

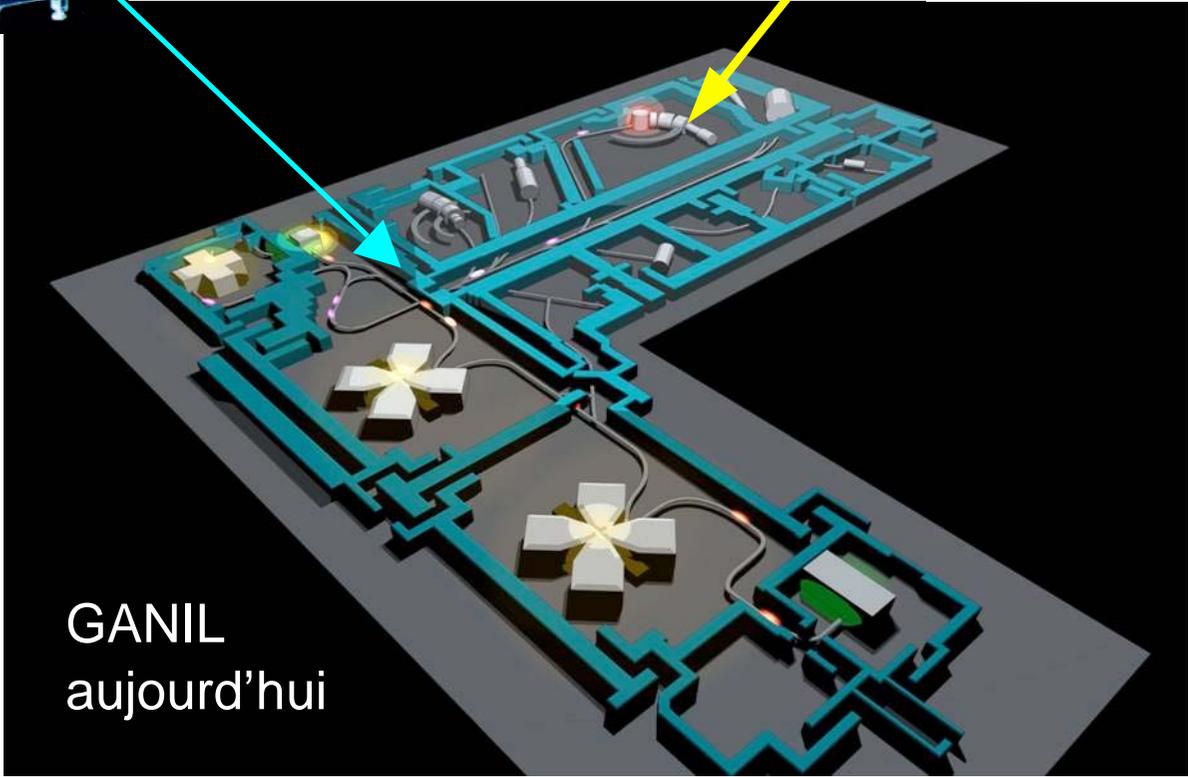
rien  $\Rightarrow \delta \Rightarrow E > S_n = 3,7\text{MeV}$



On voit apparaître de nouveaux "gaps" et en disparaître d'autres...



# De Sissi à SPEG



source images: <http://www.ganil.fr/>

Synthèse des  
noyaux exotiques:  
installations et détecteurs  
"IN2p3"

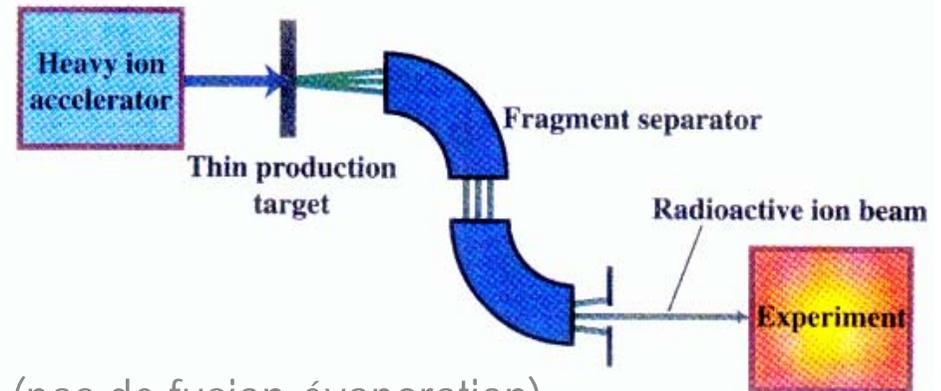
# Aujourd'hui

## Fragmentation

GANIL/SISSI-LISE  
(GSI, RIKEN, NSCL/MSU)

+ large variété d'éléments

- mauvaise qualité de faisceau,
- manque de flexibilité dans l'énergie: Haute (pas de fusion-évaporation)

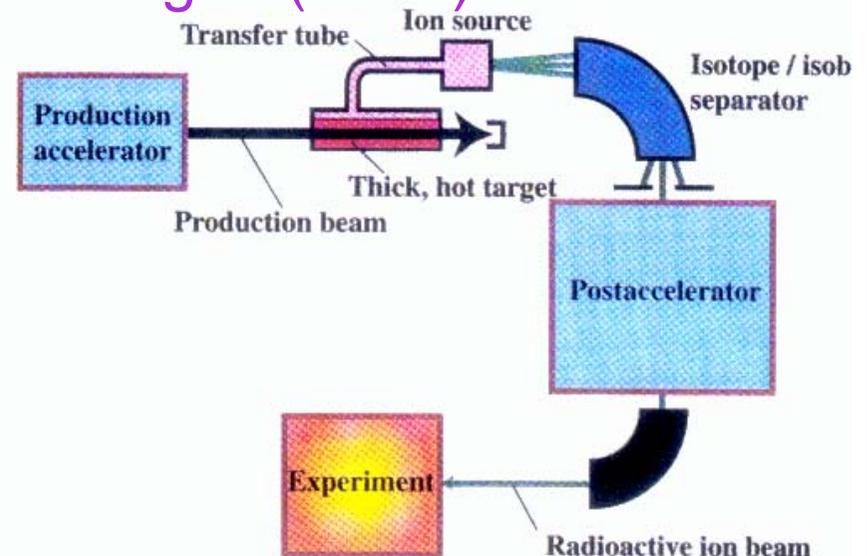


## Séparation isotopique en ligne (ISOL)

REX/ISOLDE (frag., spall.,fiss.)  
GANIL/SPIRAL (frag. proj.)  
(ISAAC/TRIUMF)

+ bonne qualité faisceau, flexibilité, intensité

- cher
- chimie source (difficile) dure un certain temps

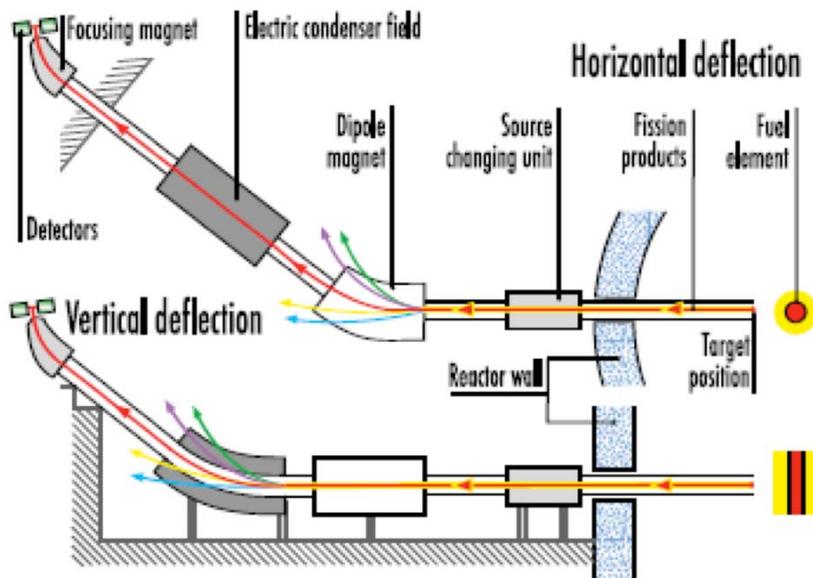
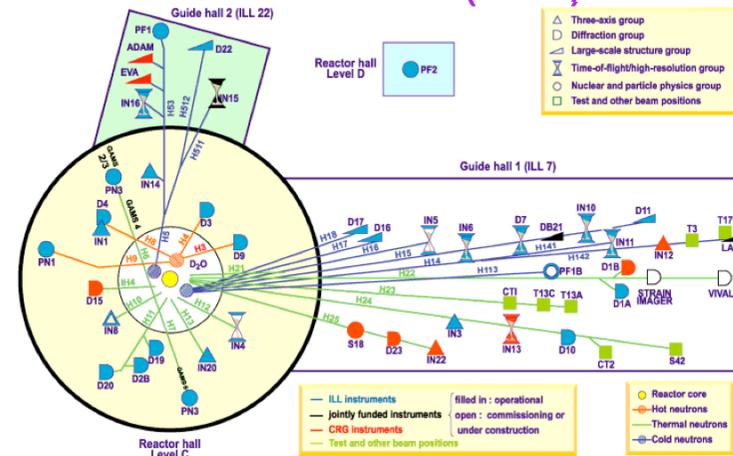


# Aujourd'hui (suite)

## Fission induite par neutrons d'un réacteur (ILL)

ILL/Lohengrin  
(MAF)

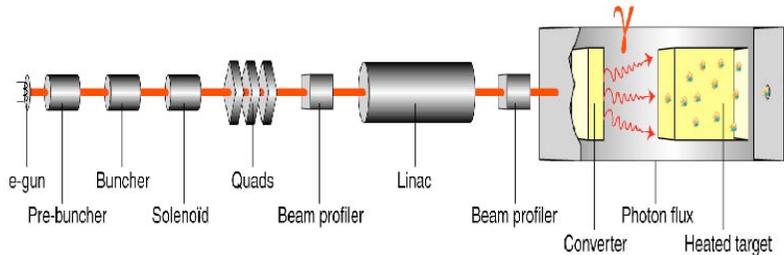
Caractéristiques ~id fragmentation





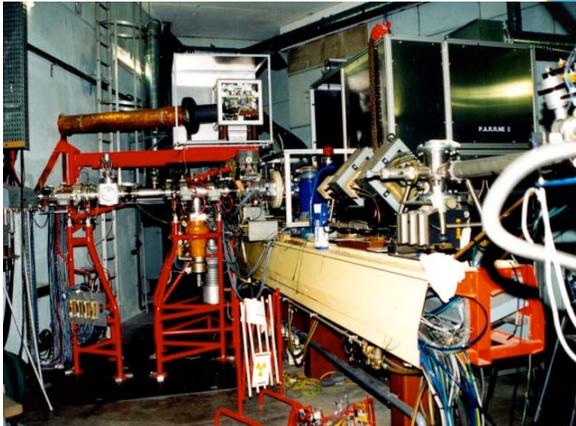
En 2009

# ALTO



fission induite par photons  
(photofission)

**Caractéristiques faisceau :**  
Energie électrons : 10-50 MeV  
Intensité : 10 mA



+ technique ISOL  
mais sans post-accélération



construction d'un nouvel accélérateur supraconducteur .

**LINAC : faisceaux stables et intenses**  
**(faire des faisceaux de leurs produits de réaction**

**H au Xe** et **deutons**  
**Xe(14.5AMeV, 1MA, A/q=3 6)** **(40MeV, 5mA)**

une aire expérimentale:  
 étude des noyaux  
 produits par réaction

une cible mince  
 puis séparation  
 ligne basse énergie

une cible épaisse  
 puis extraction, séparation,  
 puis accélération. Ex: n+U



convertisseur C

neutrons



# Dans les cinq-dix ans à venir



équipements existants

CIME  
accélérateur  
 $E < 25$  A MeV

faisceau basse  
énergie Lirat

faisceau d'ions  
lourds stables

linac supraconducteur  
 $E = 14.5$  A MeV  $A/q=3$   
 $E=40$  MeV deutons

accès direct aux caves G1/G2

séparateur de masse

station de production  
convertisseur C- cible  $CU_x$   
 $\leq 10^{14}$  fissions/s

source de  
deutons 5mA

source  
d'ions  
 $A/q = 3$   
1mA

RFQ

# Les faisceaux exotiques sont rares et précieux:

Inévitable...  
Ils sont radioactifs  
⇒ leur nombre ↘  
avec t  
et  
d parcourue

⇓  
Perte d'intensité  
÷ 10 par n ou p en +

⇓  
détecteurs encore  
plus  
performants

$$I = \sigma \times \Phi \times N \times \epsilon_1 \times \epsilon_2 \times \epsilon_3 \times \epsilon_4 \times \epsilon_5$$

$\sigma$ : section efficace,  $\Phi$ : intensité faisceau primaire,

$N$ : épaisseur de cible,

$\epsilon_1$ : efficacité de relâchement et transfert des produits,

$\epsilon_2$ : efficacité de la source d'ions ,

$\epsilon_3$ : efficacité de perte due à la décroissance radioactive,

$\epsilon_4$ : efficacité du spectromètre,

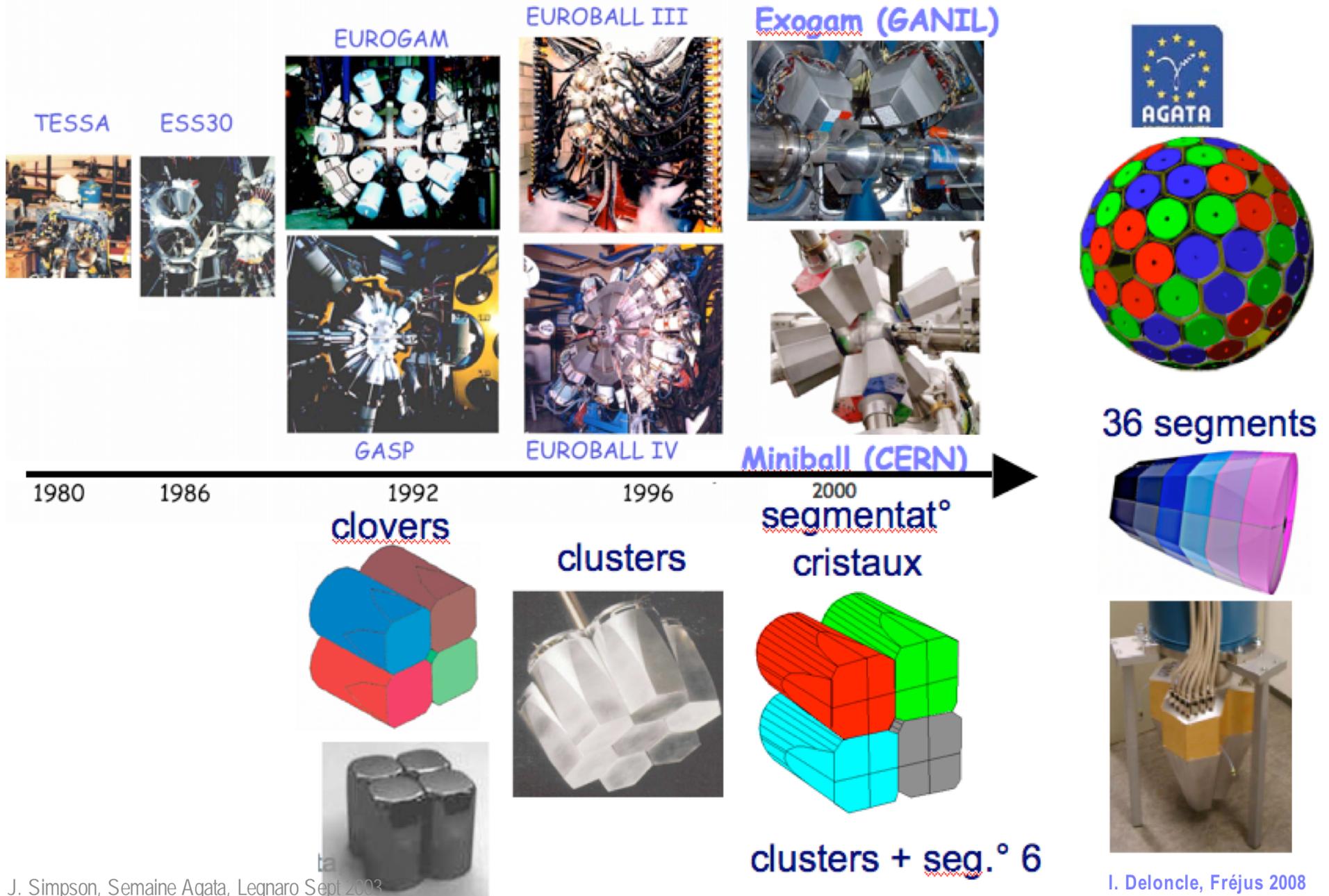
$\epsilon_5$ : efficacité de post-accélération,

$$\Phi \times N = \text{Luminosity}$$

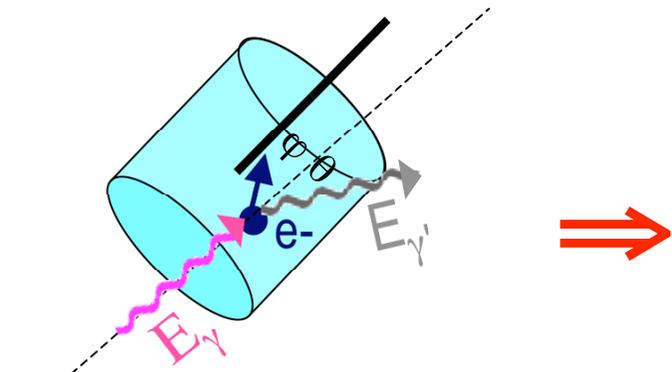


Alex C. Mueller, CERN PS-Div., June 2001

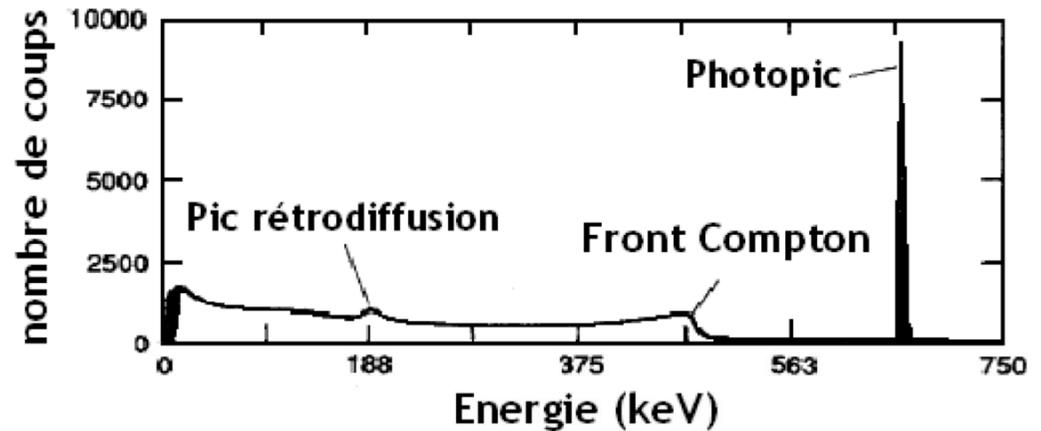
# Détecteur Germanium la Next Generation



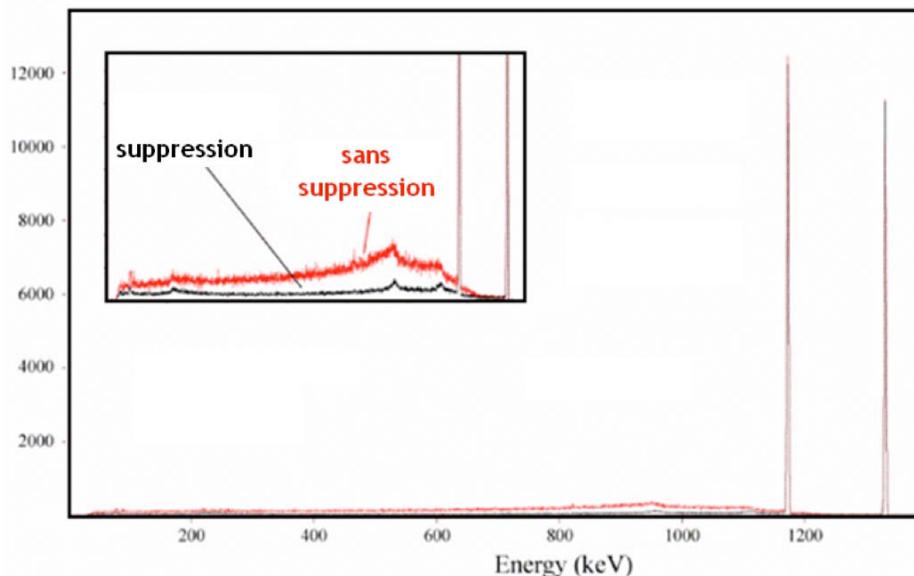
# Une lutte contre la diffusion Compton



Seule une partie de  $h\nu$  est cédée à  $e^-$  :  
 $h\nu'$  peut être perdue pour la science  
 $E_{e^-}$  de 0 (pour  $\theta = 0^\circ$ ) à max (pour  $\theta = 180^\circ$ )  
 si  $180^\circ$   $h\nu'$  peut être recueillie (rétrodiffusion)



Spectre de  $^{137}\text{Cs}$  montrant le photopic (pleine énergie) à 662 KeV, le front Compton et le pic de rétrodiffusion  
<http://www.fas.org/sgp/othergov/doe/lanl/lib-www/la-pubs/00326397.pdf>



sans suppression : P/T ~ 30%

avec suppression : P/T ~ 50%

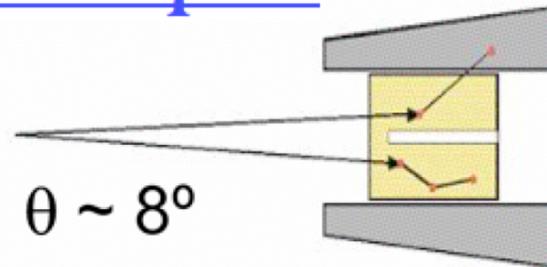
# Diffusion Compton

## Ge avec bouclier anti-Compton

$\epsilon_{\text{ph}} \sim 10\%$

$N_{\text{det}} \sim 100$

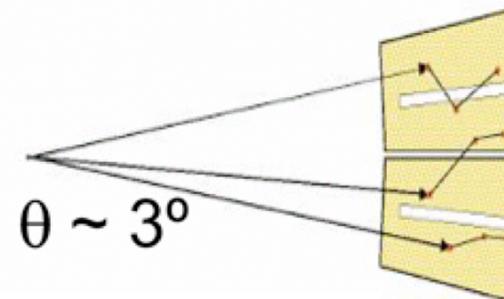
$\Omega \sim 40\%$



## Sphère de Ge

$\epsilon_{\text{ph}} \sim 50\%$

$N_{\text{det}} \sim 1000$

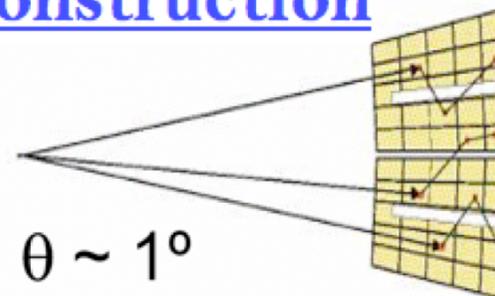


## Groupe de Ge avec reconstruction

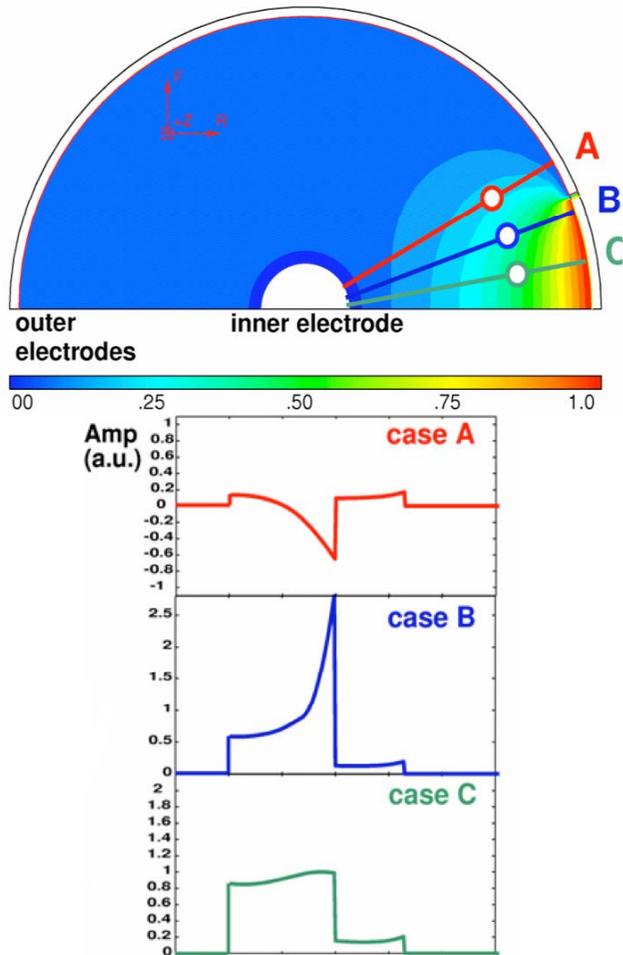
$\epsilon_{\text{ph}} \sim 50\%$

$N_{\text{det}} \sim 100$

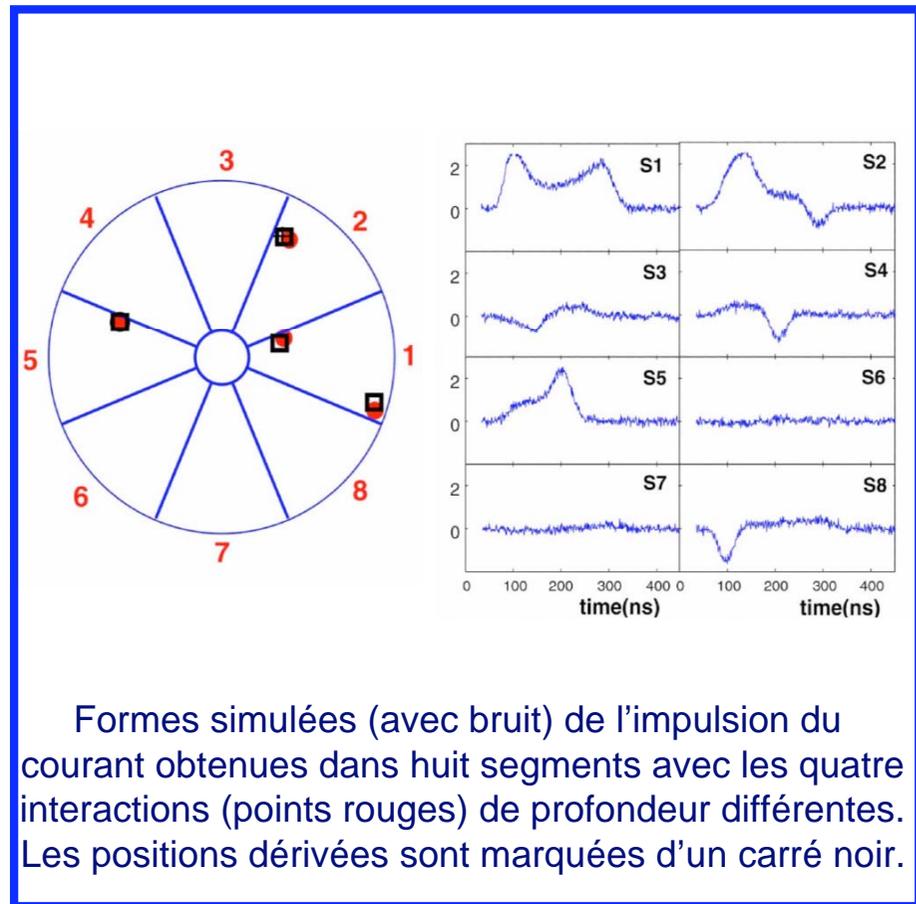
$\Omega \sim 80\%$



# Segmentation des détecteurs



Signaux induits par trois interactions ayant lieu à des angles différents mais même distance radiale de l'électrode dans un segment de détecteur coaxial.



Formes simulées (avec bruit) de l'impulsion du courant obtenues dans huit segments avec les quatre interactions (points rouges) de profondeur différentes. Les positions dérivées sont marquées d'un carré noir.

# Et contre l'effet Doppler

## Animation !

Ce qu'elle entend quand elle lui joue du violon sur le train  
Ce que lui entend

cliquer sur le lien <http://www.seed.slb.com/en/scictr/lab/doppler/train.htm>



# Effet Doppler:

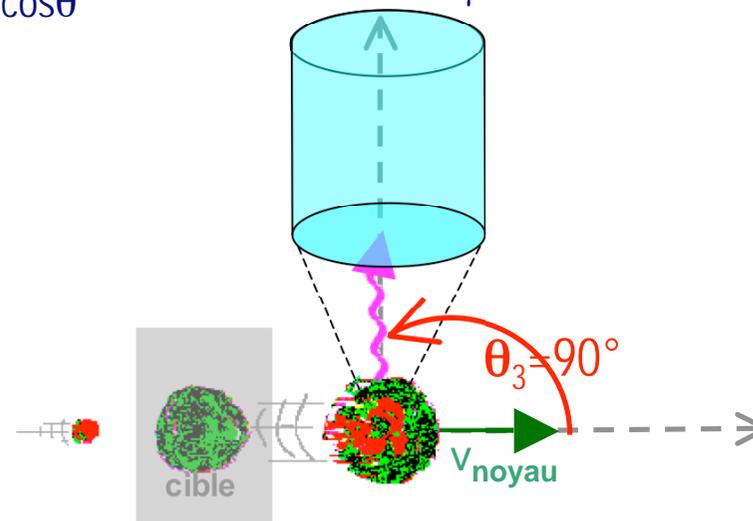
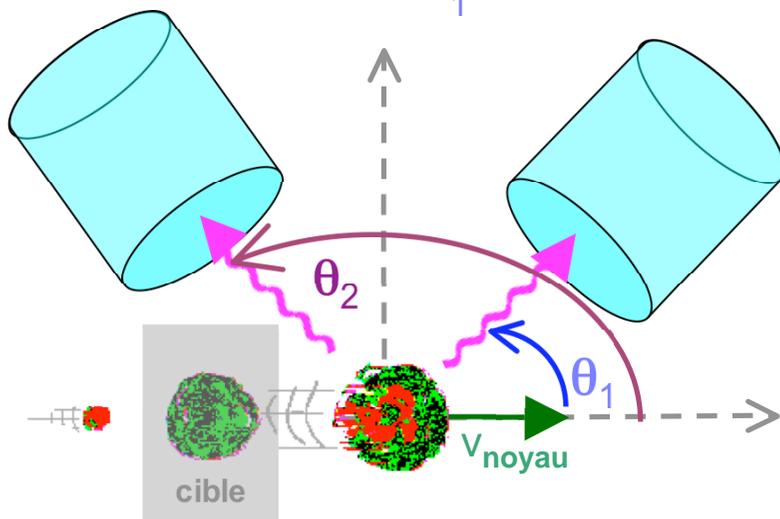
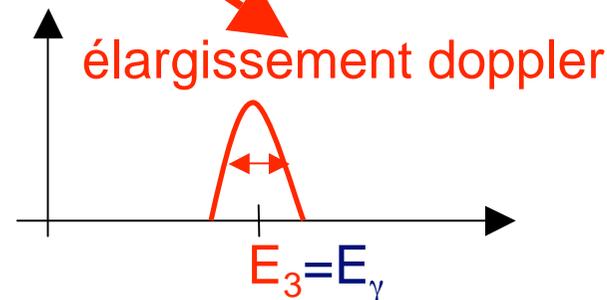
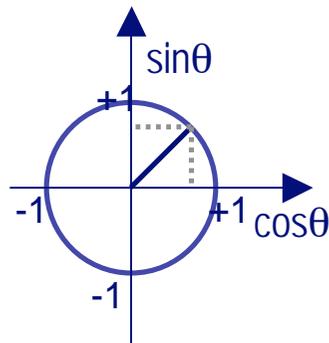
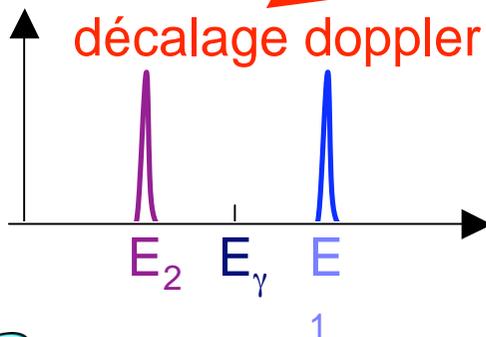
Observateur : Fréquence onde change en fct de vitesse **et** direction émetteur

$\gamma$  : fréquence  $\Leftrightarrow$  énergie (  $E = h\nu$ ,  $\nu$  fréquence)  $\gamma \Rightarrow$  énergie détectée pas bonne !

On a :  $E_{\text{dét.}} = E_{\gamma} \left(1 + \frac{V_{\text{noyau}}}{c} \cos\theta\right)$

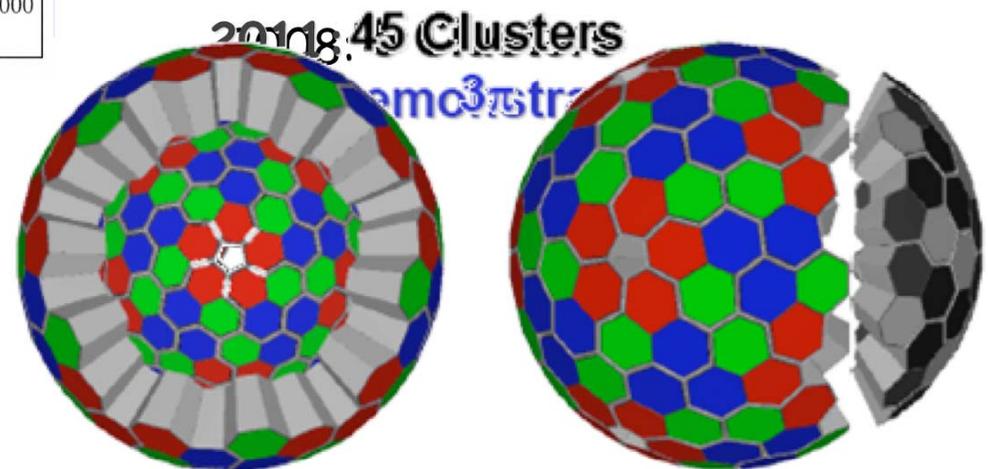
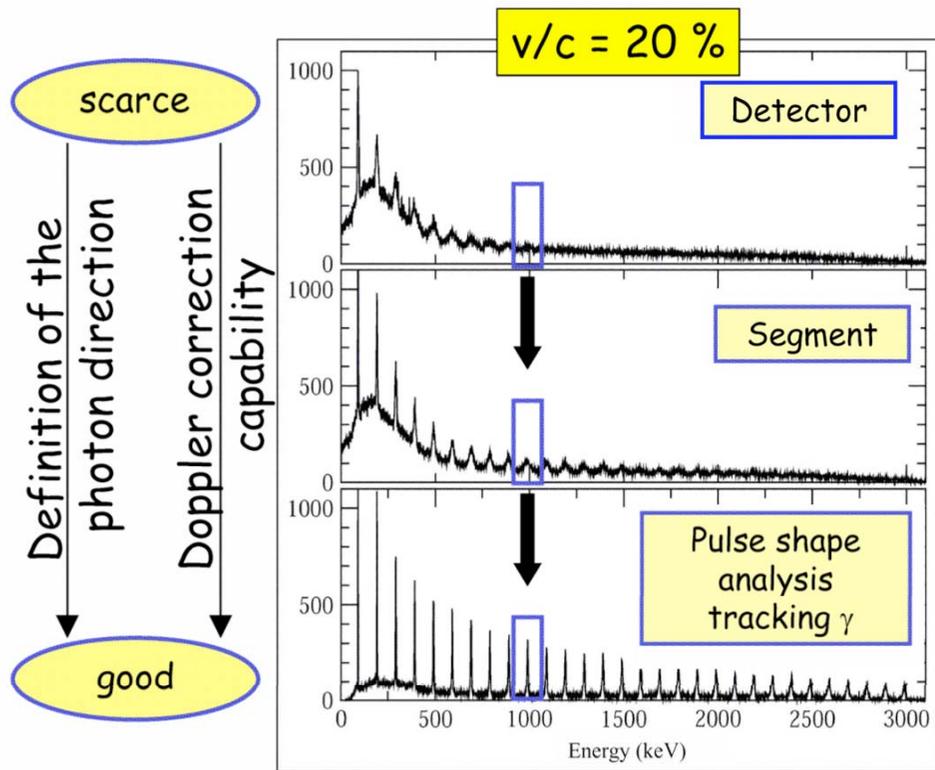
donc

$\Delta E_{\text{dét.}} = E_{\gamma} \frac{V_{\text{noyau}}}{c} \sin\theta \Delta\theta$

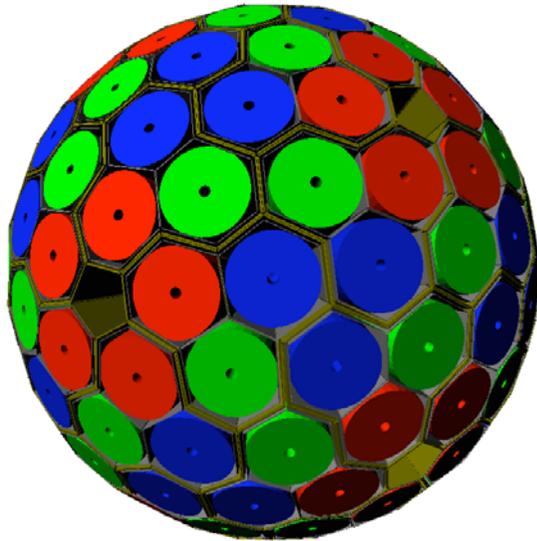
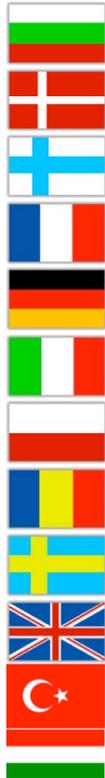


$\Rightarrow$  réduire la taille des détecteurs ou des segments

# Effet Doppler et Agata



# Caractéristiques d'AGATA



180 cristaux Ge gros vol.  
segmentés en 36 élts,  
assemblés en 60 triple- "clusters" (trèfle)

⇒ ~340 kg de Ge en 6480 élts : 6660 voies électroniques

électronique digitale + algorithmes d'analyse de forme d'impulsion

→ reconstruction des parcours de  $\gamma$

## Performances d'AGATA

**Efficacité:** 40% ( $M_\gamma=1$ )      25% ( $M_\gamma=30$ )  
aujourd'hui      ~10% (gain ~4)      5% (gain ~1000)

**Pic/Total:** 55% ( $M_\gamma=1$ )      45% ( $M_\gamma=30$ )  
aujourd'hui      ~55%      40%

**Résolution angulaire :** ~1°

**Résolution en énergie :**

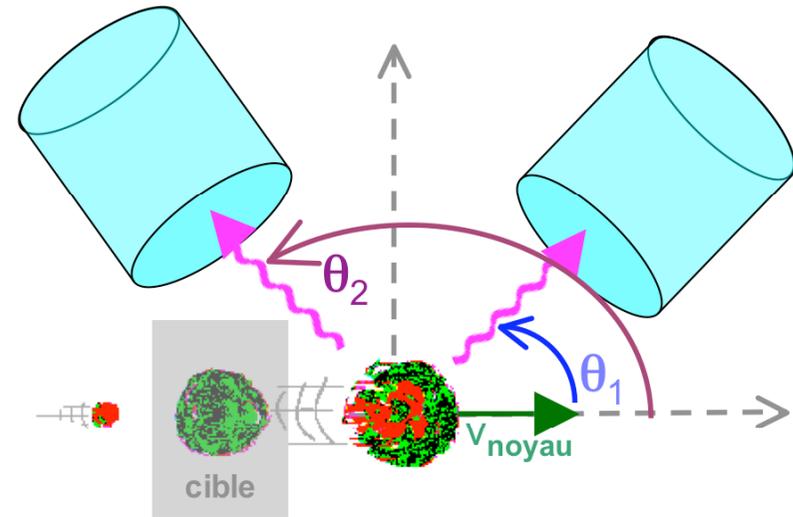
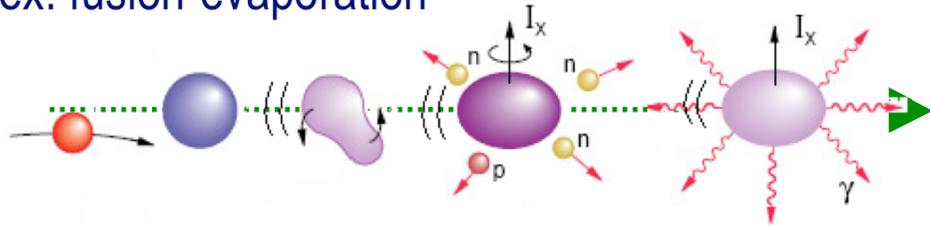
**FWHM (1 MeV,  $v/c=50\%$ )** ~ 6 keV !!!  
aujourd'hui      ~40 keV

**Taux de comptage:**

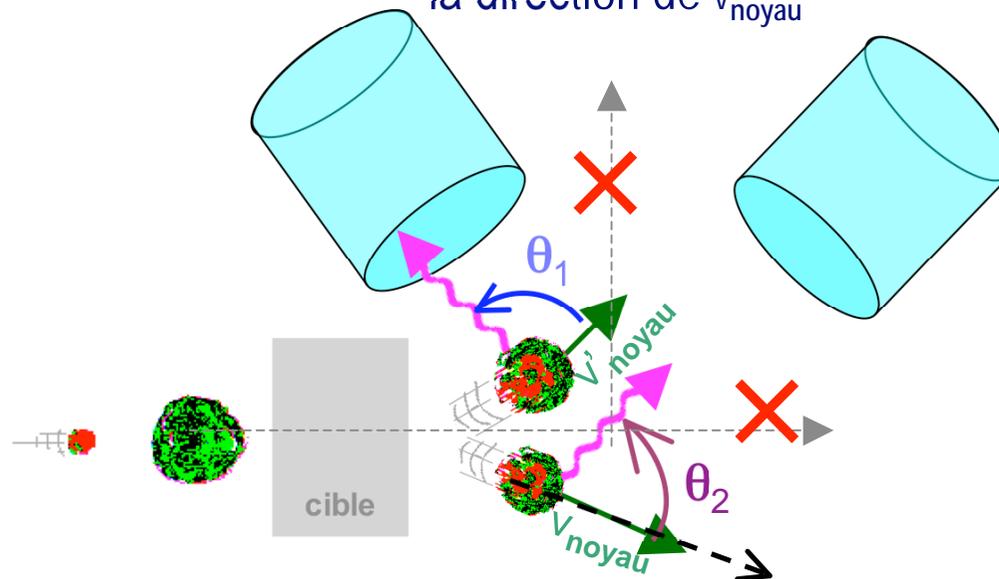
3 MHz ( $M_\gamma=1$ )    300 kHz ( $M_\gamma=30$ )  
today      1 MHz      20 kHz

# Retour sur Effet Doppler

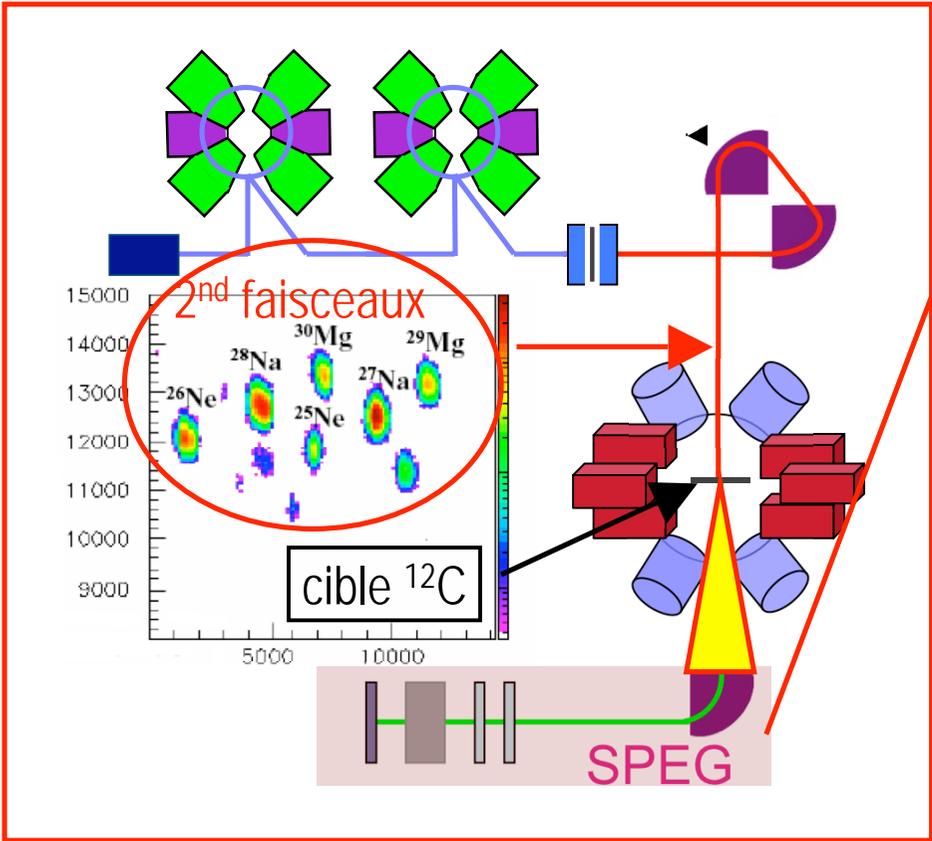
Correction Doppler impose soit d'utiliser des réactions très 'piquées' vers l'avant : ex: fusion-évaporation



soit de mesurer avec un autre détecteur la direction de  $v_{\text{noyau}}$



# Spectromètre



Ex: SPEG un spectromètre  
Mais mieux vaut choisir la réaction  
pour privilégier l'avant :  
**noyau le plus lourd en projectile**  
tirer avec la boule plutôt qu'avec le  
cochonnet....



[http:// www.sp](http://www.sp)

[20de% 20boule.jpg](http://www.sp)

On ne craint rien en arrière

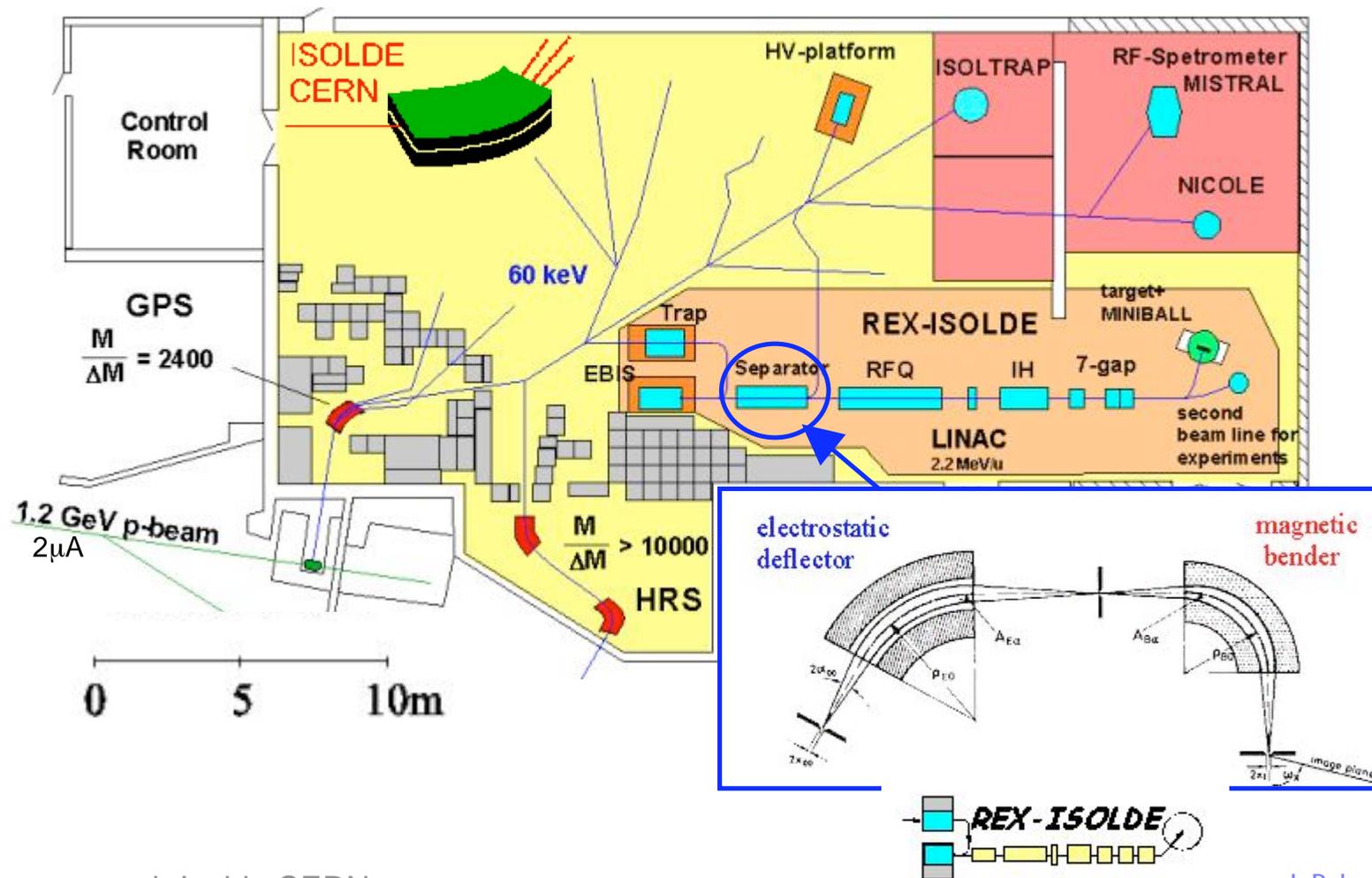
<http://joopterhaar.hjhosting.nl/Jeu% 20de% 20Boules/cochonnet.jpg>

mais accélérer un projectile lourd + coûteux en énergie

# Spectromètre en Séparateur de faisceau

ISOL : Isotopic Separator On Line

Charge des ions faisceau permet de les défléchir avec des aimants quadripole magnétique et/ou des champs électriques



# 1<sup>ère</sup> étape Déflecteur électrostatique (Rex/Isolde)

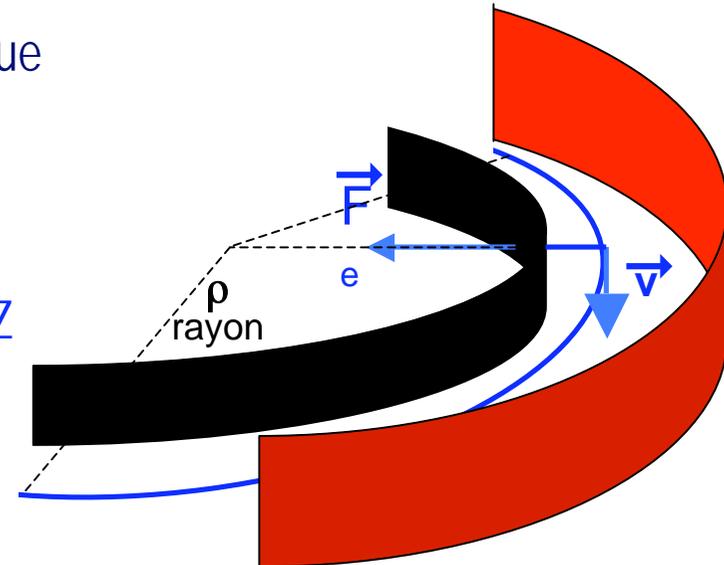
electrostatic deflector



En mécanique classique  
champ électrique  $\vec{E}_e$ :

$$\vec{F}_e = Q \vec{E}_e$$

Q charge de l'ion  $\leq Z$



**mouvement circulaire si**

$F_e \equiv$  force centrifuge  $F_c = M v^2 / \rho$  (lance-pierre)

$\Rightarrow Q E_e = M v^2 / \rho$  ( $M \approx$  masse du noyau  $A c^2$ ,  $A = Z + N$ )

$\Rightarrow E_e \rho = M v^2 / Q$

$\Rightarrow$  1<sup>ère</sup> sélection mais noyaux avec même  $[(M/Q) v^2]$  au même pt en sortie...

soit beaucoup ...encore :

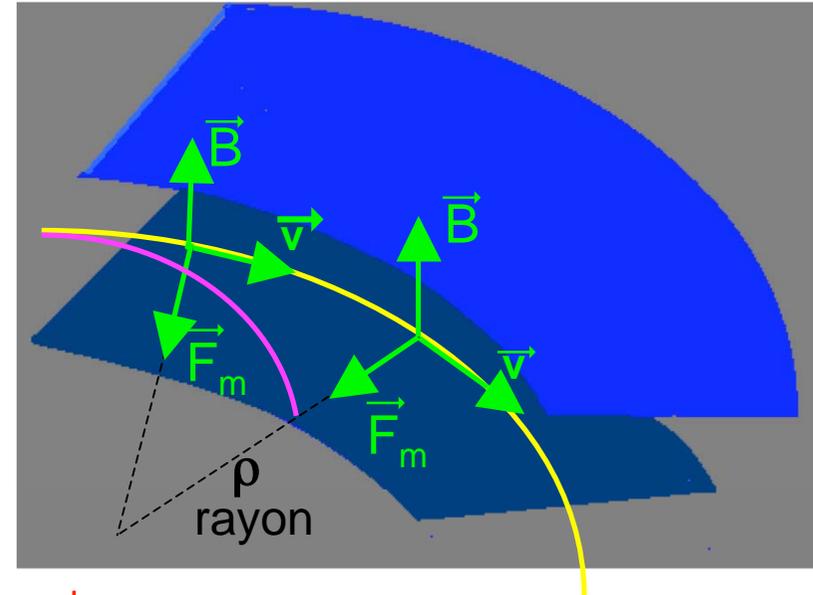
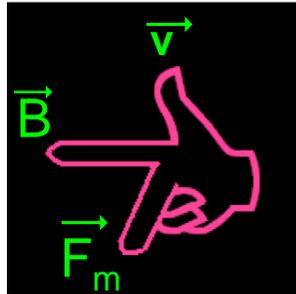
ex: même  $(v, \text{ et } (M/Q))$  :  $(v, [M \pm m / (Q \pm q)])$

# Ou 1<sup>ère</sup> étape : Dipole magnétique Lise (Ganil)

En mécanique classique  
champ magnétique :

$$\vec{F}_m = Q \vec{v} \wedge \vec{B}$$

Q charge de l'ion  $\leq Z$   
v vitesse de l'ion



mouvement circulaire si

$$F_m \equiv \text{force centrifuge } F_c = M v^2 / \rho$$

$$\Rightarrow QvB = M v^2 / \rho \quad (M \simeq Ac^2, A = Z+N)$$

$$\Rightarrow B \rho = (M/Q) v \quad (B \rho = \text{rigidité magnétique})$$

$$(\text{si } v/c \text{ important} \Rightarrow \text{relativité} \Rightarrow B \rho = \gamma (M/Q) v \text{ avec } \gamma = \sqrt{1 - (v/c)^2})$$

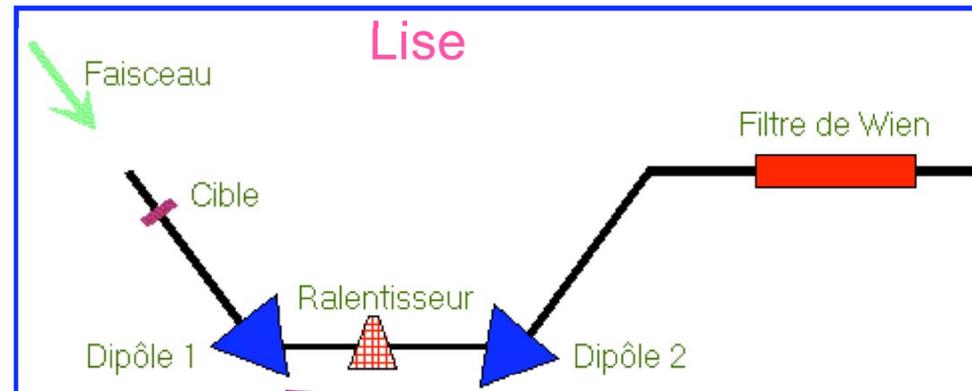
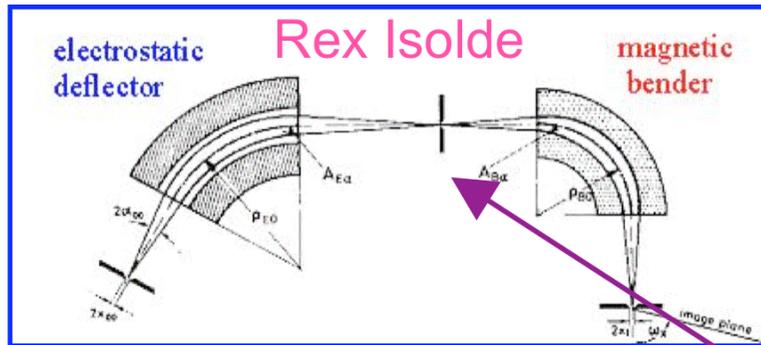
$\Rightarrow$  noyaux avec même  $[(M/Q) v]$  au même pt en sortie... (pas très sélectif)

$\Rightarrow$  nécessité deuxième étape

N.B: en sortie  $E_{\text{classique}} = \frac{1}{2} m v^2$ ,  $B \rho = (M/Q) v \Rightarrow E_{\text{classique}} = Q^2/M (B \rho)^2$

et  $\Delta B \rho / B \rho = \frac{1}{2} \Delta E_{\text{cla}} / E_{\text{cla}}$

## 2 et 3<sup>ème</sup> étape



### 2<sup>ème</sup> étape:

Séparer les produits de réactions  $\Rightarrow$  ralentisseur (fine épaisseur de matière (Be))  
 perte d'énergie rel. d'1 ion dans dégradeur  $\Delta E/E \propto A^3/Z^2 \Rightarrow$  on modifie  $v$  pour  $\neq A/Z$   
 $\Rightarrow$  on distingue  $(v, \text{ et } (M/Q))$  de  $(v', [M \pm m/(Q \pm q)])$

### 3<sup>ème</sup> étape: Un champ E ou B finira le travail, ils discriminent en $v^2$

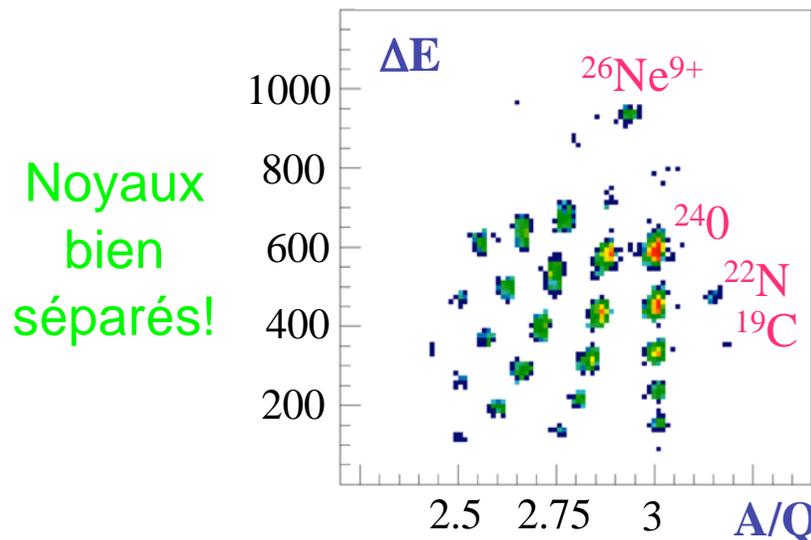
Rex/Isolde:  $B\rho \rightarrow (B\rho)' = B\rho + \Delta B\rho$  avec  $\Delta B\rho/B\rho = \frac{1}{2} \Delta E/E$

Pour Lise : Dipôle et

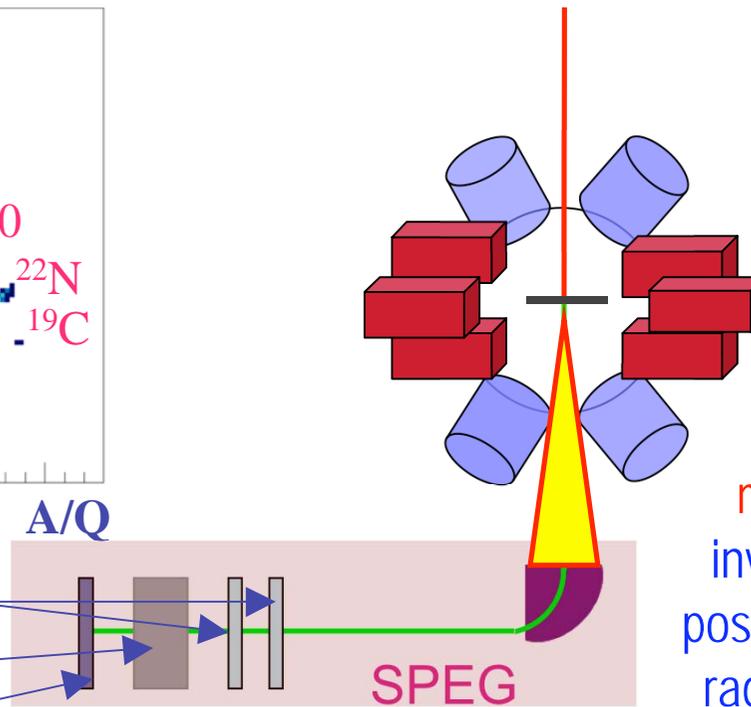
Filtre de Wien (B + E) donc transmission si  $F_e = F_m \Rightarrow QE = QvB \Leftrightarrow v = E/B$

Spectromètre = dipôles magnétiques, dégradeur  
 + parfois quadripôles magnétiques ( focalisation en entrée et/ou en sortie)

# De SPEG à Vamos: évolution Spectromètres d'aval



X, Y chambres à dérives  
 $\Delta E$  chambre d'ionisation  
 E, t scintillateur



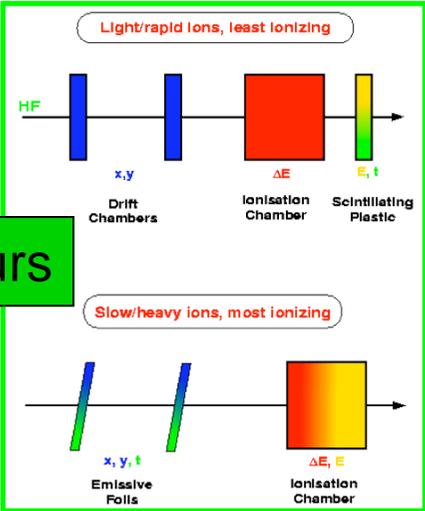
mais cinématique inverse pas toujours possible avec faisceaux radioactifs disponibles  
 SPIRAL :  $^{6,8}\text{He}$ ,  $^{13}\text{N}$ ,  $^{14,15,19-22}\text{O}$ ,  $^{18}\text{F}$ ,  $^{17-19,23-27}\text{Ne}$ ,  $^{31-35,42-46}\text{Ar}$ ,  $^{72-77,79,81}\text{Kr}$   
 (source: site internet SPIRAL)

dipôles magnétiques + détecteurs (remplacent dégradeur)  
 ⇒ "identification" off-line (hors ligne)

restriction due à l'acceptance limitée ⇒ progrès possible : spectromètre à large acceptance (un ordre de grandeur), adaptable à la géométrie de la réaction, mais avec fort taux de rejection du faisceau à  $0^\circ$  (fonction de filtre de vitesse) ....

# Vamos pour SPIRAL

angle variable de 10 à 60°



séparation en v

Filtre de Wien

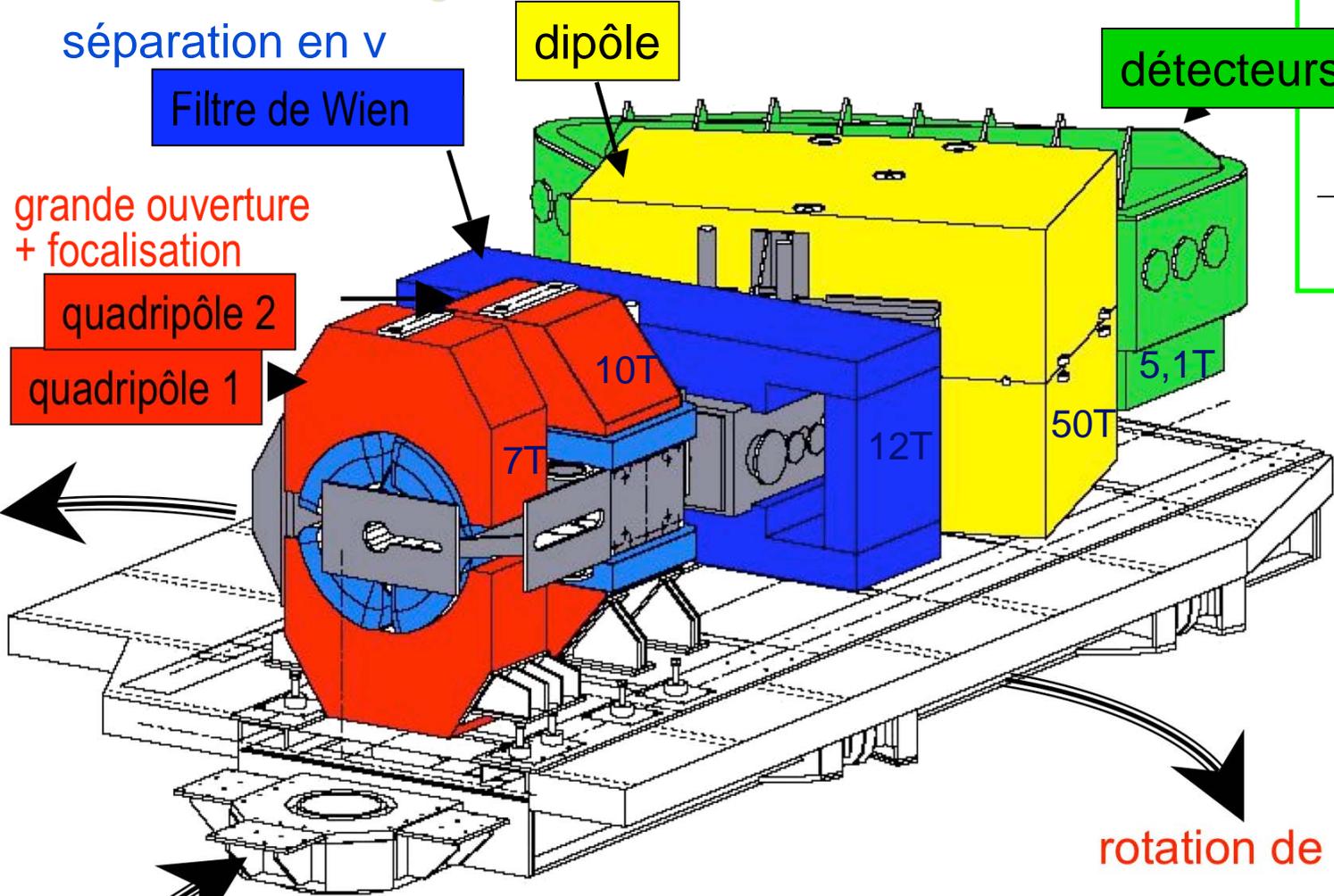
dipôle

détecteurs

grande ouverture  
+ focalisation

quadripôle 2

quadripôle 1



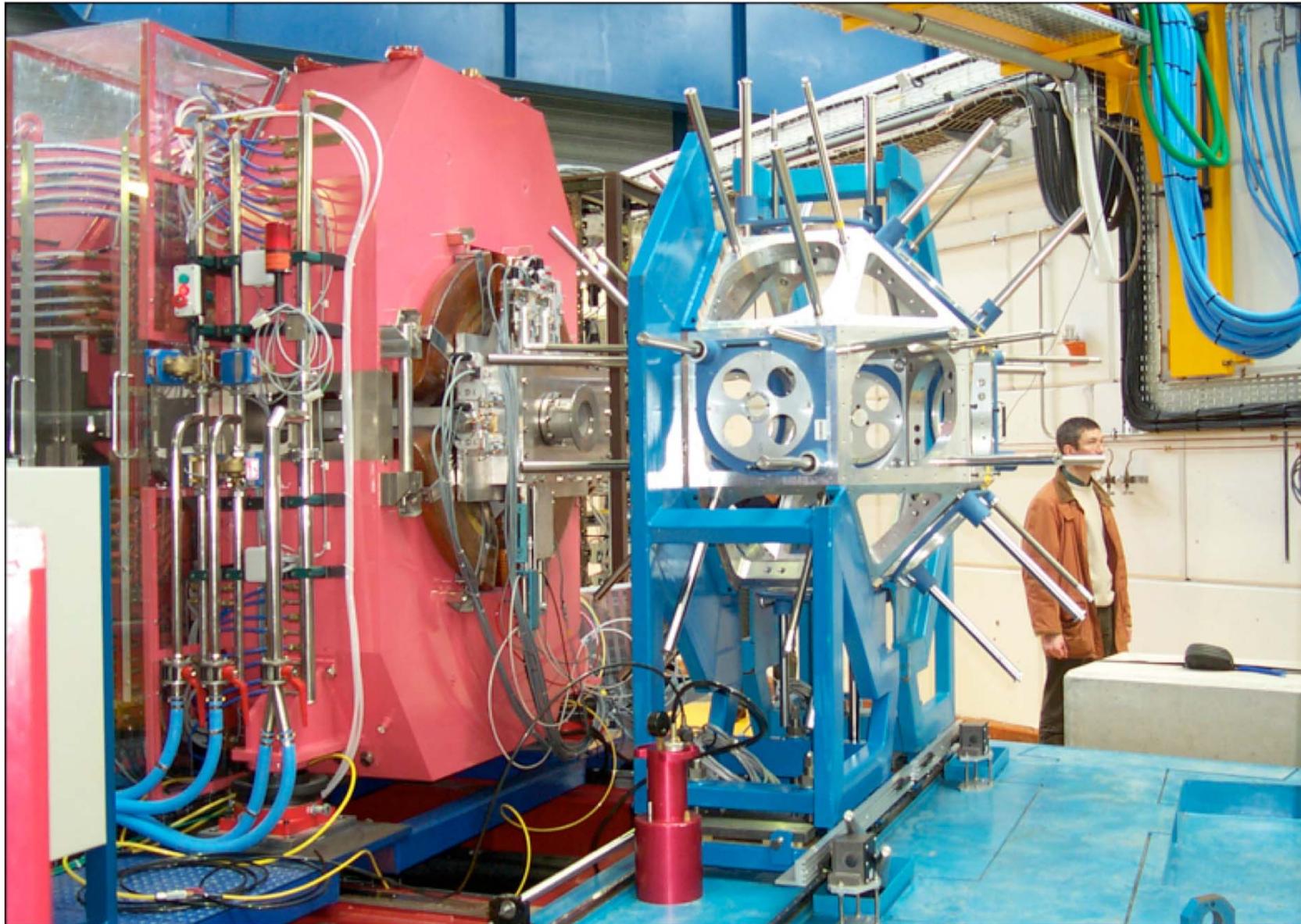
rotation de  $\sim \pm 90^\circ$

translation:

masse totale embarquée 85T : une locomotive !

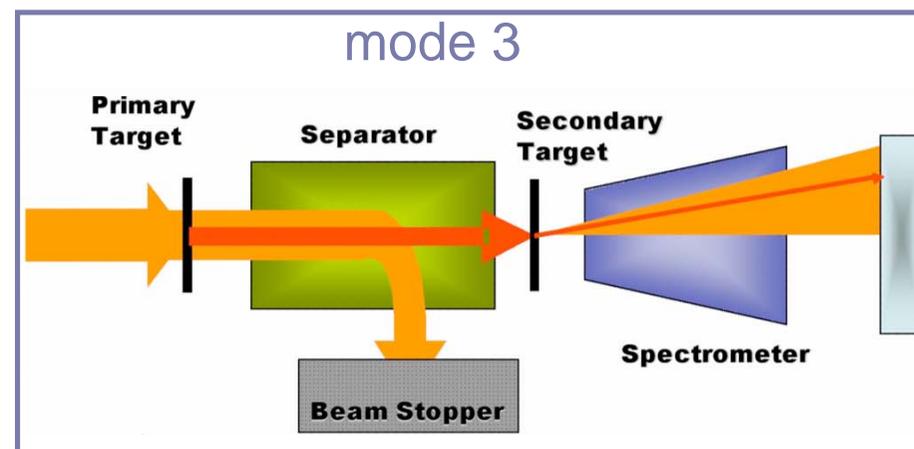
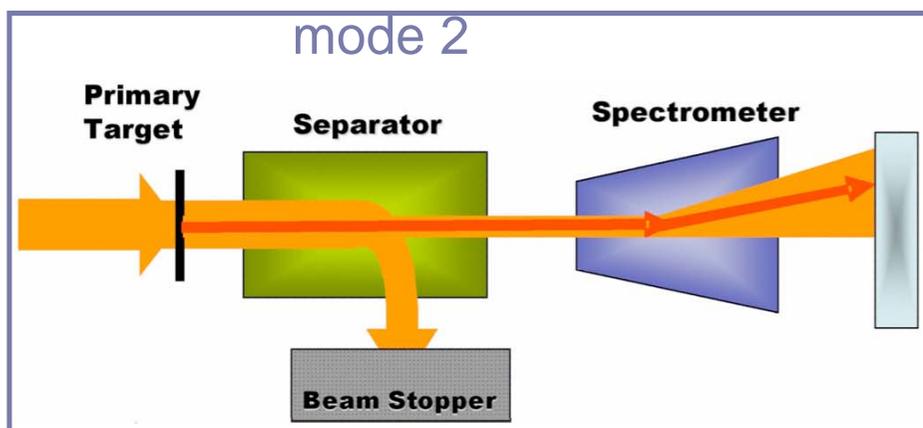
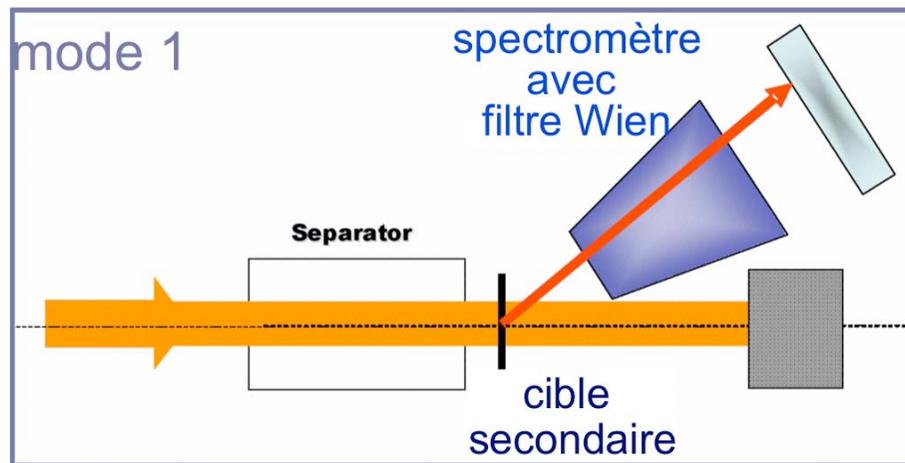
distance à la cible de 0,4 à 1 m

Vamos en vraie grandeur

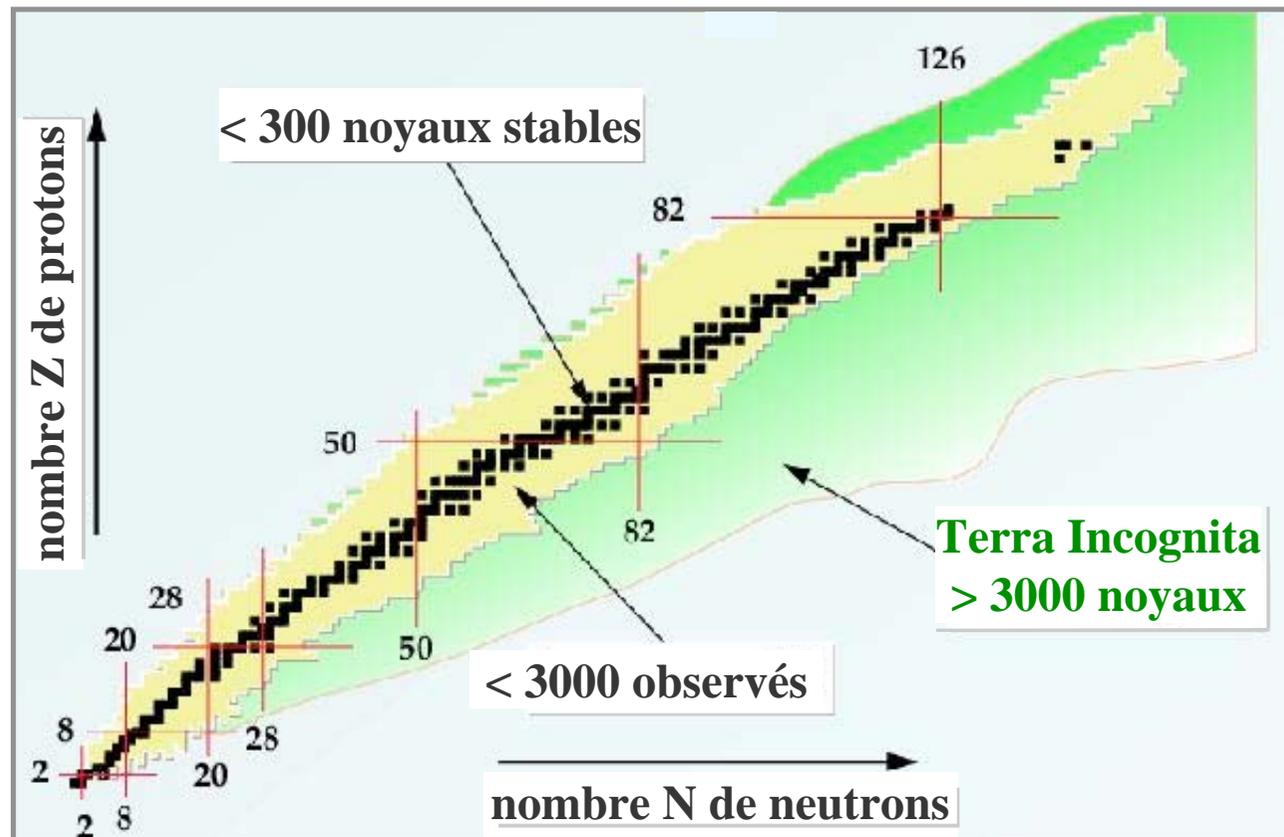


## S<sup>3</sup>: The Super Separator Spectrometer for LINAG Beams

2 étages de filtration  
 + 1 cible entre les deux  
 étages  
 + le spectromètre mobile  
 = encore + de versatilité....  
 3 modes de fonctionnement



# Nous en étions à ... Vaste Programme !



Attention ! Observés ne veut pas dire étudiés...mais plutôt synthétisés

étudier = caractériser statiquement et dynamiquement un noyau

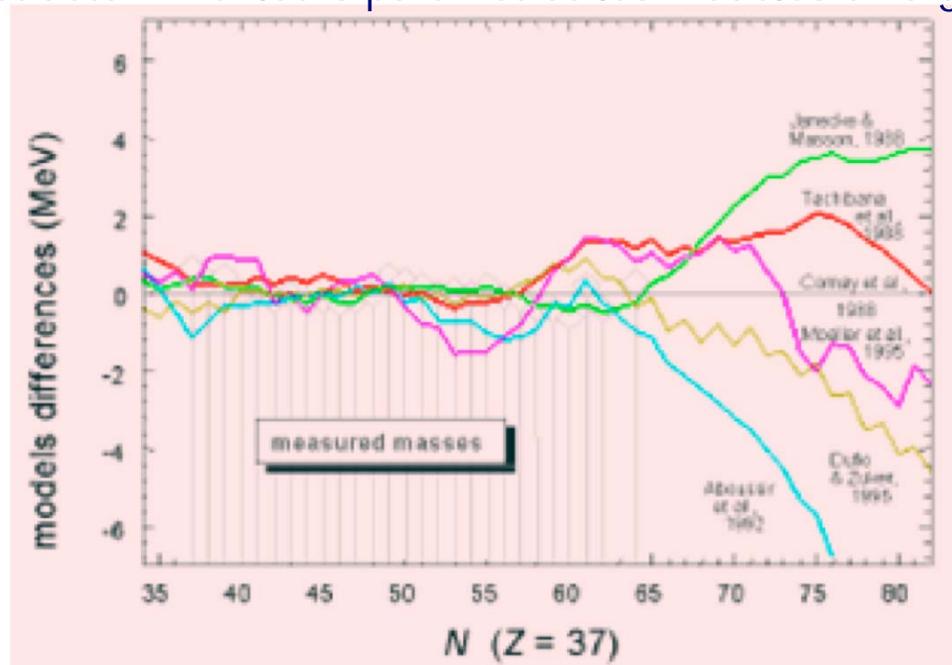
- quelle est sa masse, sa taille, sa forme ?
- que se passe-t-il quand on lui fournit de l'énergie (ou excitation)?

⇒ il faut produire chaque noyau en grand nombre

Un exemple de mesure:  
mesures de masse

# Pourquoi mesurer des masses

En dehors des zones de noyaux bien connus, utilisés pour élaborer les modèles et déterminer leurs paramètres les modèles divergent.....



Et non seulement nous avons besoin de les mesurer, mais en plus il nous faut le faire avec une très grande précision

$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$
-	-	-
astrophysics shells	sub-shells pairing	pairing halos

# Mesure directes de masse avec spectromètre

si ion transmis mvt circulaire

$$F_m \equiv \text{force centrifuge } F_c = M v^2 / \rho$$

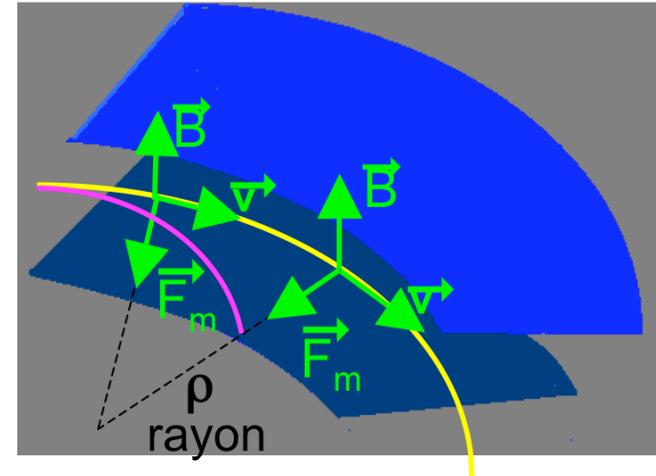
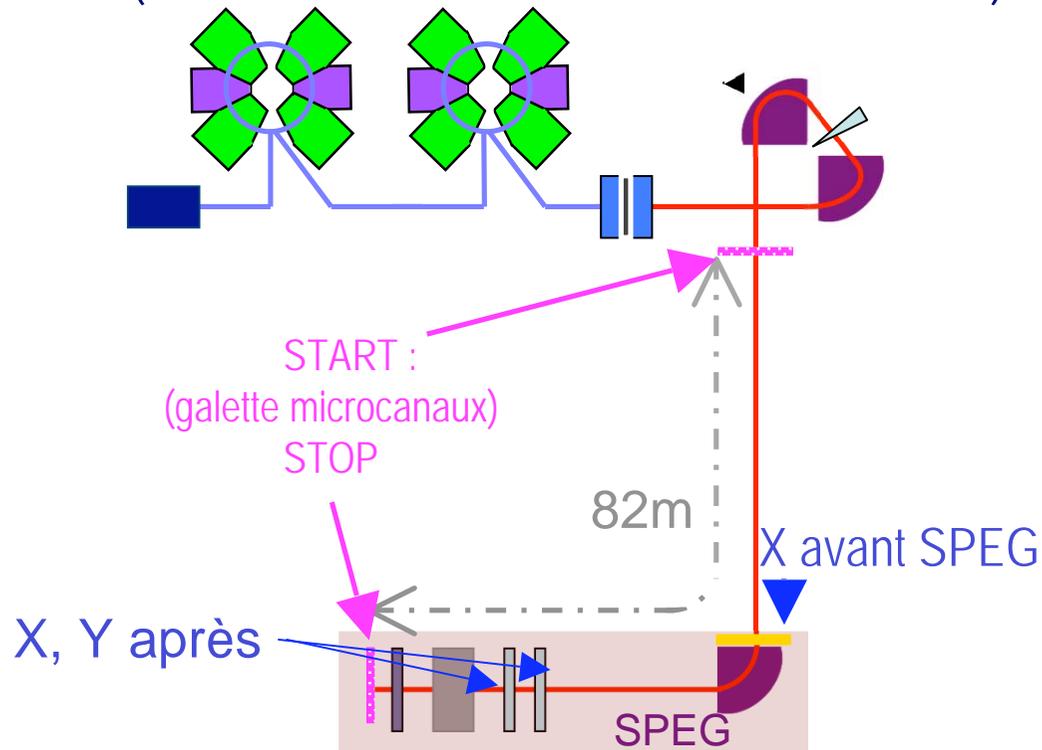
$$\Rightarrow QvB = M v^2 / \rho \quad (M = Ac^2, A = Z+N)$$

$$\Rightarrow B \rho = (M/Q) v \quad (B \rho = \text{rigidité magnétique})$$

$$\Rightarrow M = B \rho v / Q$$

$\Rightarrow$  il suffit de mesurer  $\rho$  et  $v$

(avec bonne sélection et bonne identification)



Start-Stop =  $t$  ( $\sim 1 \mu\text{s}$ )  
+ distance parcourue  
 $\Rightarrow v$

X initial et X (+ Y) final  
+ optique magnétique  
 $\Rightarrow \rho$

$\Rightarrow M \pm \delta M$   
avec  $\delta M/M \approx 2-4 \cdot 10^{-4}$

# Mesure de masse avec cyclotron

Dans les "Dee" ( $D \equiv \text{D}$ ) :

mvt circulaire dû au champ B

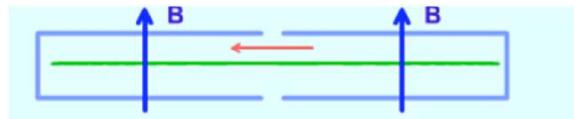
$$\Rightarrow QvB = M v^2/\rho$$

$$\text{rayon } \rho = (M/QB) v$$

$\Rightarrow \rho$  dépend de v

fréquence ion  $f = \omega/2\pi = (Q/M) B$

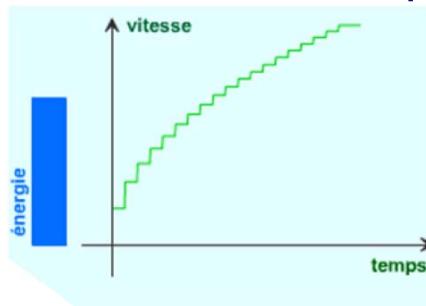
$\Rightarrow f$  indt de  $\rho$  et de v



champ magnétostatique

$$E_{\max}(\rho_{\max}) = \frac{1}{2} M v_{\max}^2$$

$$= \frac{1}{2} (Q^2/M) B^2 \rho_{\max}^2$$



Entre les Dee :

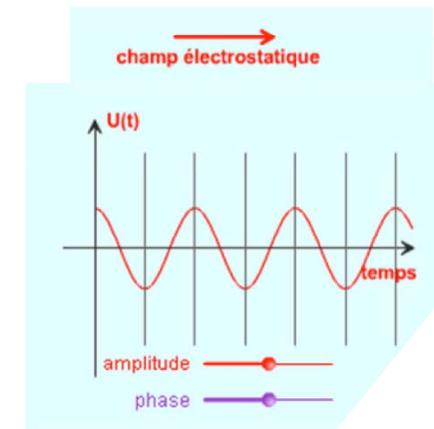
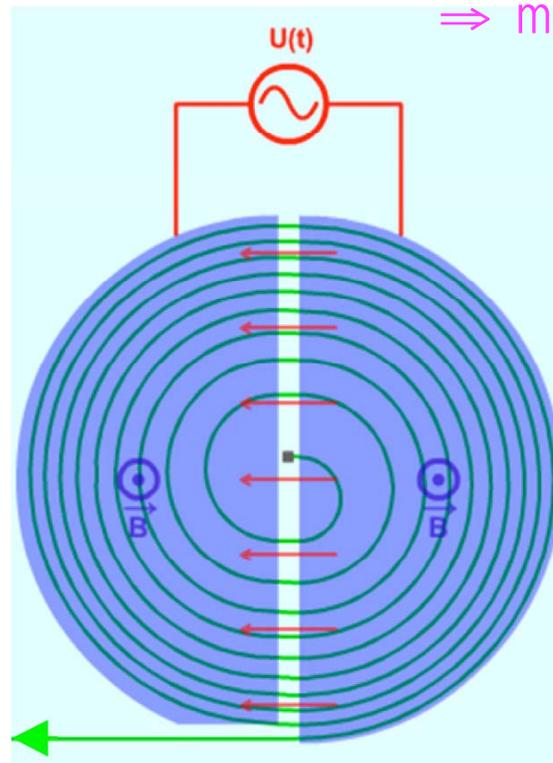
une force en plus  $F = Q E$

Principe Fondamental Dynamique (PFD)

$$F = M dv/dt \Rightarrow v \nearrow : M dv/dt = Q E$$

$$\Rightarrow v \rightarrow v+dv \quad dv = (Q/M) E dt \Rightarrow \rho \nearrow$$

$\Rightarrow$  mouvement en spirale



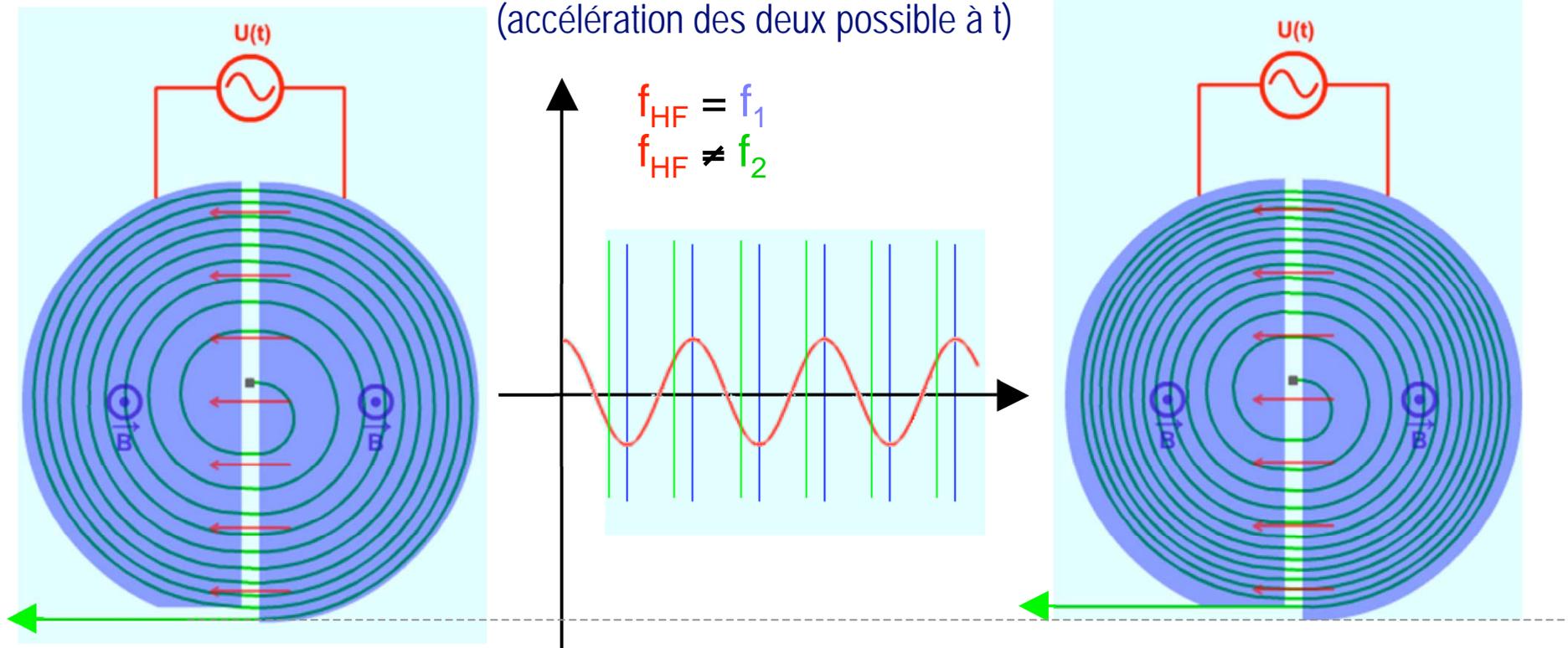
Animation :

cliquer sur le lien et variez la phase de la tension (retard et avance)

<http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/gtulloue/Meca/Charges/cyclotron.html>

# Des faisceaux différents dans cyclotron

Si deux faisceaux :  $(Q_1/M_1) \neq (Q_2/M_2)$   
 $Q/M$  assez proches pour que  $(f_{HF} =) f_1 \sim f_2$   
 (accélération des deux possible à  $t$ )



1) variation  $f$  : durée  $dt$  d'accélération  $\searrow$   
 à chaque tour  $dv_1 \gtrsim dv_2$   
 $\sim 200$  tours  $\Rightarrow v_1 > v_2, t_1 - t_2 > 0$   
 $200$  tours  $\Rightarrow d \sim \text{km} !!!$  précision  $\nearrow$

2) différence de  $Q/M$  :  $(Q_1/M_1) \gtrsim (Q_2/M_2)$   
 par ex:  $Q_1 = Q_2$  mais  $M_1 < M_2$   
 $\Rightarrow (dv_1/dt_1) = (Q_1/M_1)E \gtrsim (dv_2/dt_2) = (Q_2/M_2)E$

Rq: 2 effets vont même sens si  $f_{HF}$  proche  $f$  léger

# Des faisceaux ≠ dans cyclotron

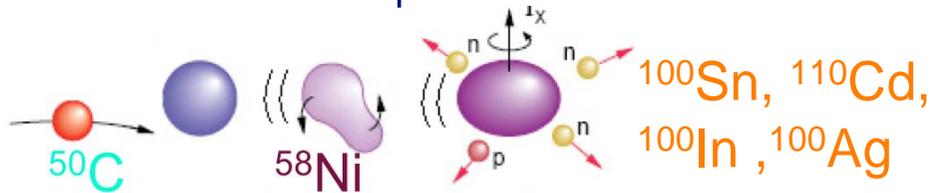
M. Chartier et al., PRL 12 Vol. 77 (1996) 2400, Hyp. Int. 132 (2001) 275

## Première étape :

Avec 1<sup>er</sup> faisceau au Q/M souhaité réglage B, f  
 (+ dégradeur pour ioniser à une charge Q donnée)  
 Ici Q/M de  $^{100}\text{Ag}^{22+}$ ,  $^{100}\text{Ag}$  masse bien connue

## Seconde étape :

Réaction sur cible épaisse entre CSS1 et CSS2

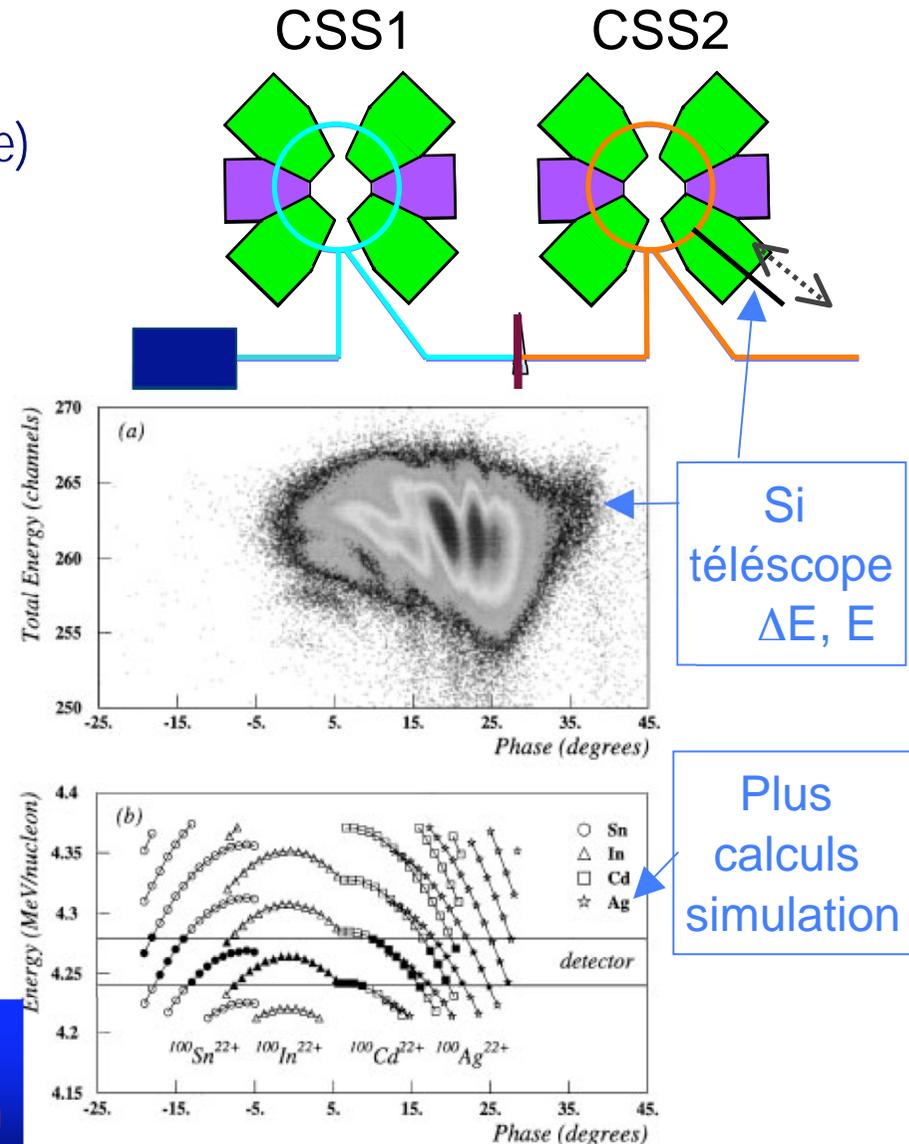


seuls leurs 22<sup>+</sup> pourront être accélérés  
 dans CSS2 (tolérance  $2 \cdot 10^{-4}$ )

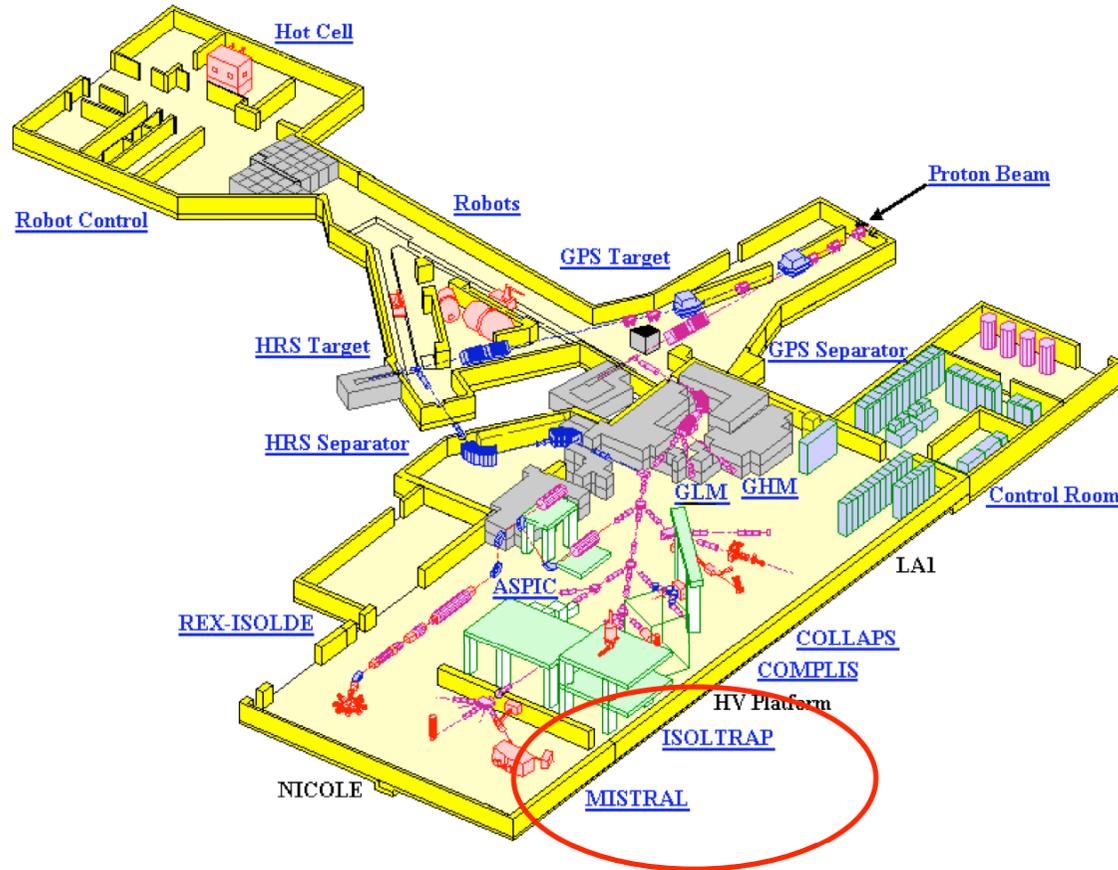
## Troisième étape :

mesure des décalages en temps à ≠ positions  
 identification par  $E = \frac{1}{2} (Q^2/M) (B\rho_{\max})^2$   
 (et/ou  $\Delta E/E \propto A^3/Z^2$ )

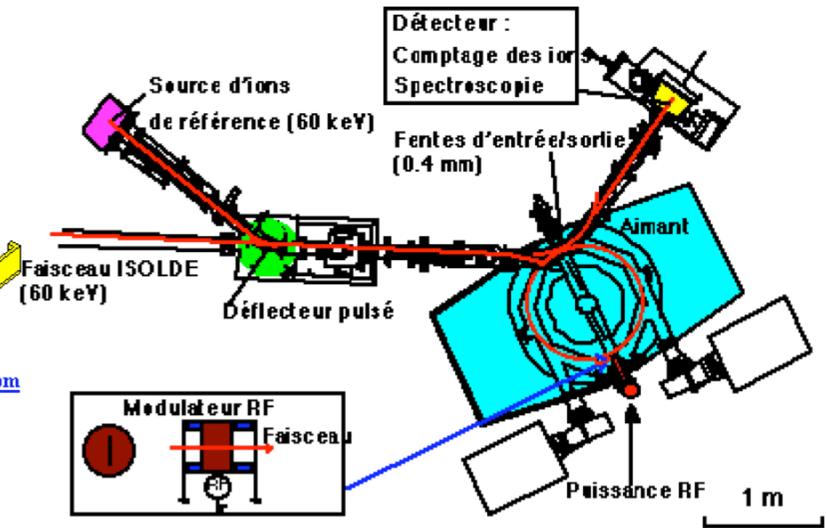
⇒  $M \pm \delta M$   
 avec  $\delta M/M \approx 3 \cdot 10^{-6}$  pour In  
 et  $\delta M/M \approx 10^{-5} \cdot 10^{-6}$



# A Isolde : Mistral et Isoltrap mesure de la fréquence cyclotron



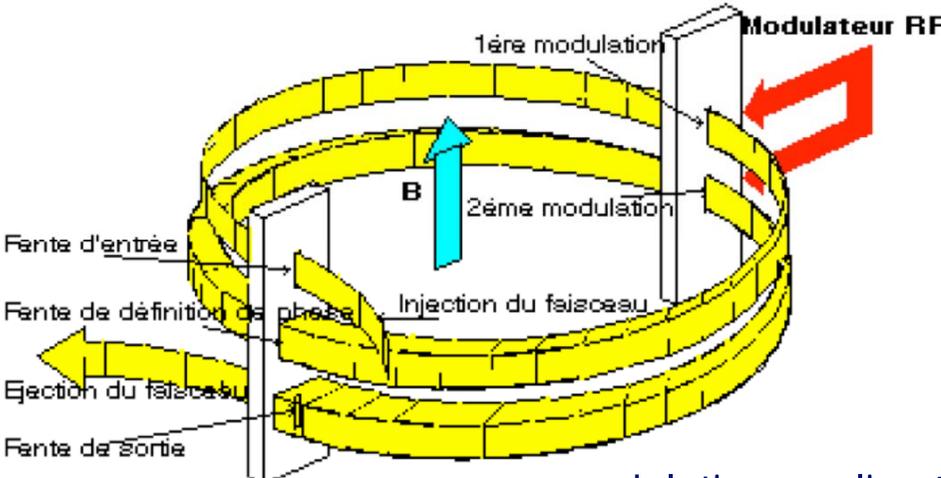
## Mistral



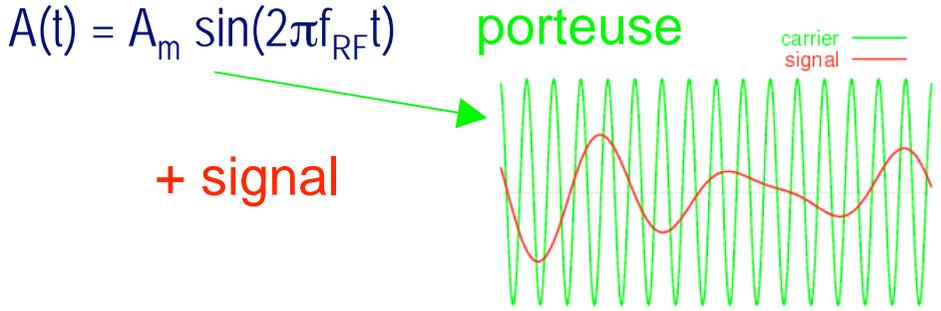
faisceau de Isolde, non post accéléré  
mesures de et à basse énergie

# Mistral

Champ **B** constant  
 $\Rightarrow qvB = mv^2/R$ , ici R est imposé  
 fréquence ion  $f_c = \omega/2\pi = (1/2\pi)(Q/M)B$   
 est appelée **fréquence cyclotron**  
 Energie =  $\frac{1}{2} (Q^2/M) B^2 r^2$   
 $= \frac{1}{2} (Q^2/M) B^2 R^2$   
 (r rayon trajectoire de l'ion imposé)  
 2 tours complets dans Mistral



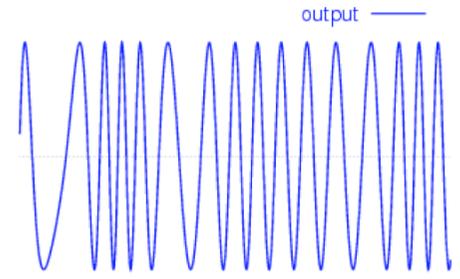
+ champ **E** variable (potentiel élect V)  
 (modulation radio fréquence RF):



=

fréquence modulée  
 Energie + qV  
 $\Rightarrow$  énergie modifiée

$E_{em} = E_0 + E_m \sin(2\pi f_{RF} t)$   
 $\Rightarrow$  rayon trajectoire modifié...



modulation appliquée deux fois: 1<sup>er</sup> et 3<sup>ème</sup> 1/2 tour :  
 $E_{em} = E_0 + E_m \sin(2\pi f_{RF} t) + E_m \sin(2\pi f_{RF} (t+t_c))$   
 $t_c$  temps d'un tour  $\equiv 1/f_c$

# Mesures avec Mistral

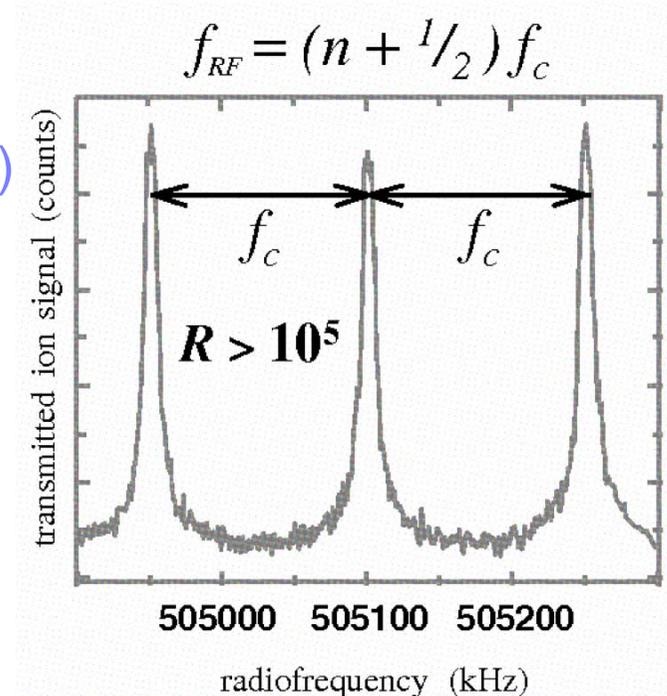
$E_{em} = E_0 + E_m \sin(2\pi f_{RF} t) + E_m \sin(2\pi f_{RF} (t+t_c))$   
pour retrouver  $E_0$  et  $r = R$   
il faut  $f_{RF} = (n + 1/2) f_c$   
sinon pas de sortie possible !

Pas si simple :

B pas parfait, inhomogène

⇒ on injecte alternativement des ions  
de masse connue...pour corriger ces effets

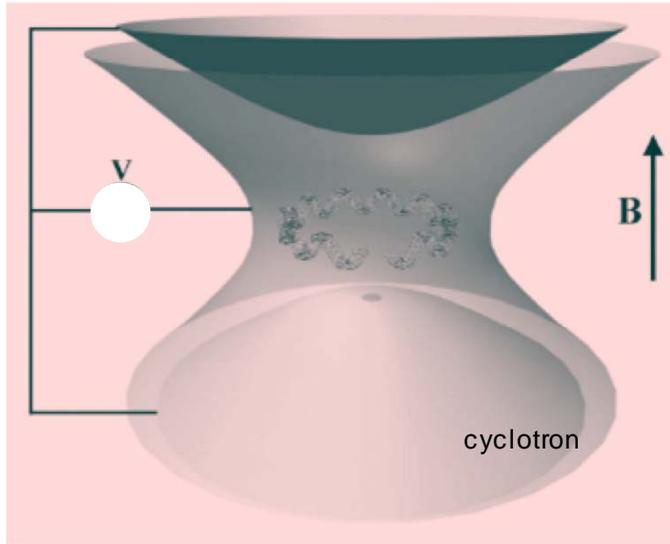
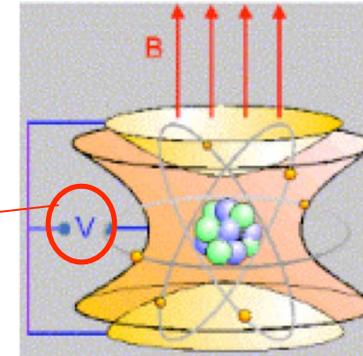
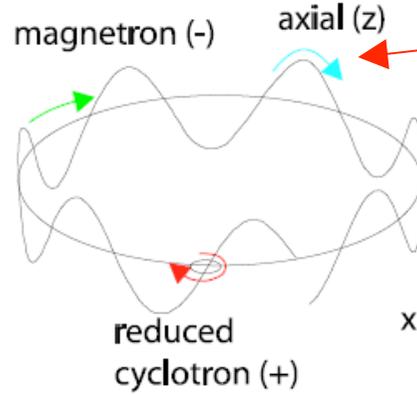
⇒  $M \pm \delta M$   
avec  $\delta M/M = 5 \cdot 10^{-7}$  pour Na



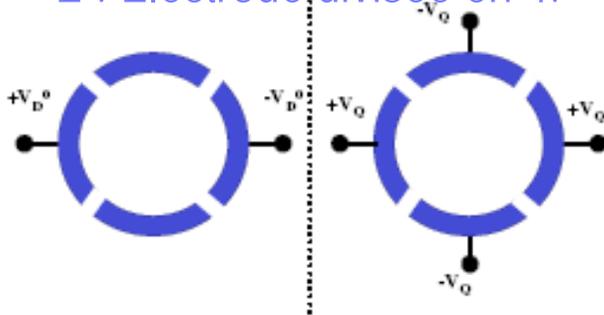
3 pics de transmission  
mesure avec un multiplicateur  
d'électrons

# Isoltrap

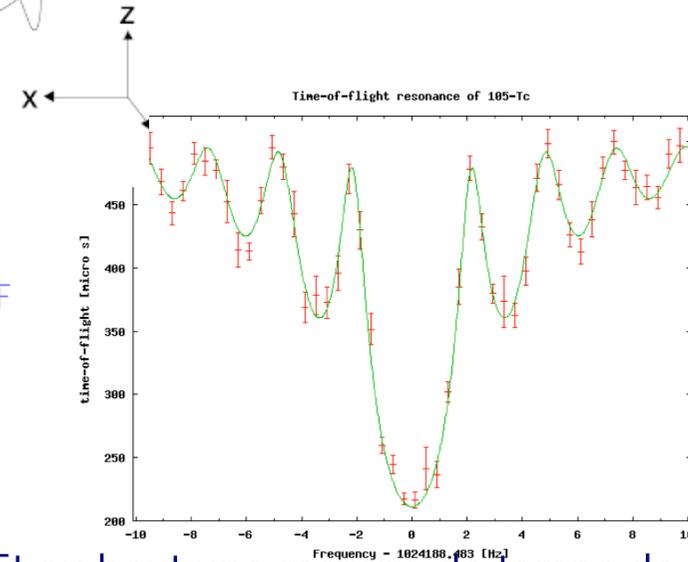
Trappe de Penning



E : Electrode divisée en 4:



⇒ excitation avec  $E_{RF}$   
⇒ transformation  
magnétron  
cyclotron



Et au bout une mesure de temps de vol

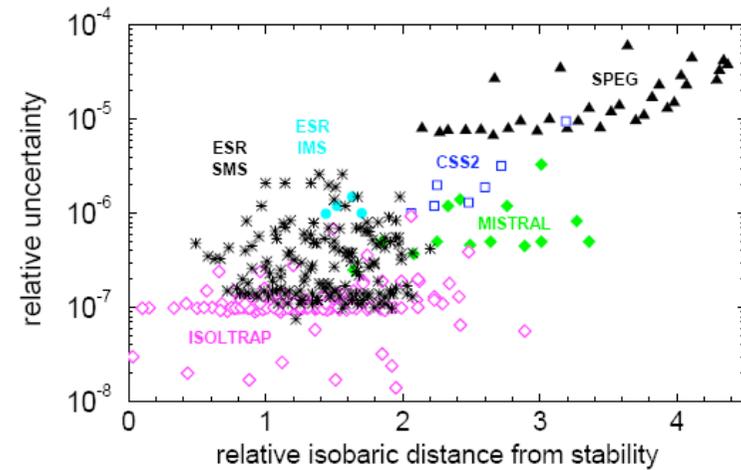
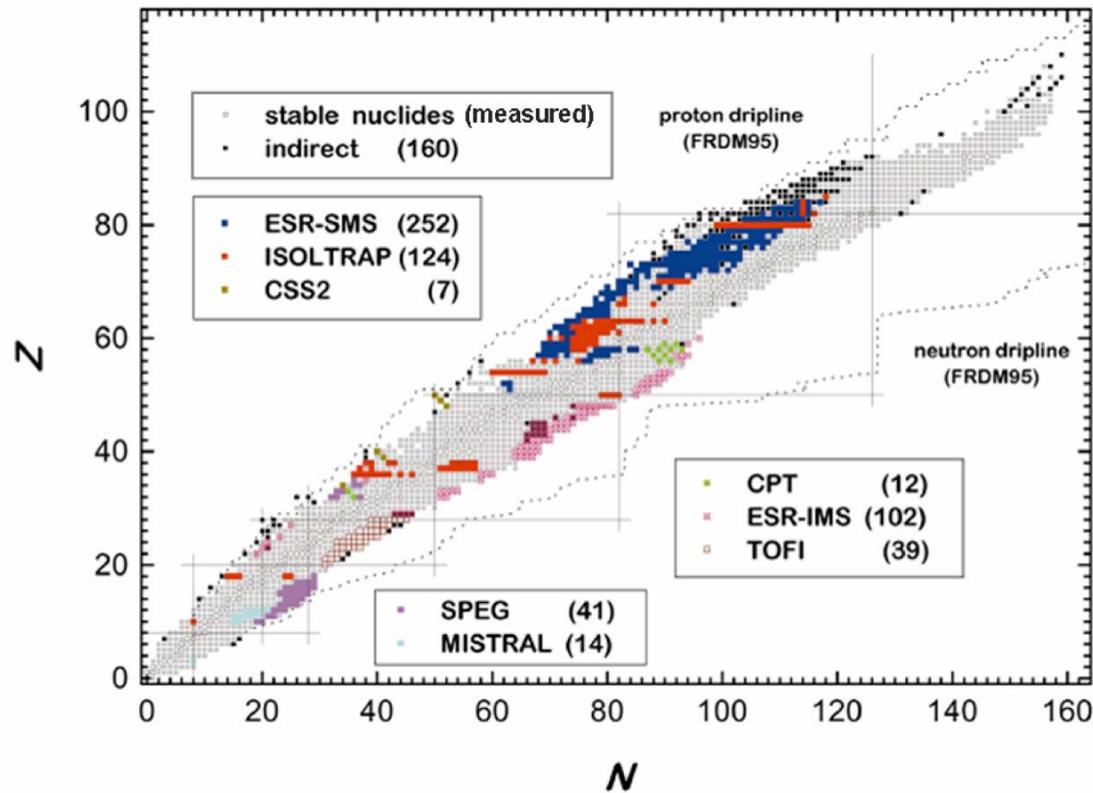
$$\text{si } f_{HF} = F_{\text{cyclotron}} \quad E = E_{\text{max}}, \quad V = V_{\text{max}}$$

$$T_{1/2} > 50 \text{ ms}$$

$$\Rightarrow M \pm \delta M$$

$$\text{avec } \delta M/M \approx 10^{-7} \text{ } 10^{-8}$$

# Zones des masses mesurées



*Rq: Mesure indirecte  $\equiv$  par bilan de réaction  $A + a \rightarrow b + B$  ou décroissance  $P\grave{e}re \rightarrow Fils + particule$*

$$Q = M_A + M_a - M_b - M_B \text{ ou } Q = M_{P\grave{e}re} - Masse_{Fils} - Masse_{part.\acute{e}mise}$$

Fin

Merci à tous les contributeurs du WEB....