

Physique Nucléaire : quelques enjeux et thématiques

Isabelle Deloncle, CSNSM

Ecole de la physique au détecteur
Fréjus Novembre 2010

Plan des cours:

I - Approche de la “Théorie” de la physique nucléaire

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

I-A) Premier chapitre : Aspects classiques

II-B) Deuxième chapitre : Aspects quantiques

II - Approche expérimentale : vers les noyaux loin de la stabilité

II-A) Troisième chapitre : Pourquoi ?
Créer des noyaux loin des zones arpentées

II-B) Quatrième chapitre : Comment ?
Synthèse des noyaux exotiques:
Installations et détecteurs “IN2P3”
Une quête: Les Superlourds

II-C) Dernier chapitre : Deux exemples de mesure :
- Mesures de masse
- Mesures de durées de vie

Si vous voulez lire sur ces sujets :

- Physique subatomique : Noyaux et Particules, L. Valentin
- Mécanique Quantique I et II, Cohen-Tannoudji, Diu, Laloë
- Wikipédia, collectif anonyme, en long en large et en travers

Ordres de grandeur ou de "minusculeur"

Nucléon: Taille en Fermi, $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$, rayon nucléon $r_0 \sim 1,1 \text{ fm}$
Charge électrique $q_{\text{proton}} = +|e|$ ($1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$), $q_{\text{neutron}} = 0$
Temps: $T_{1/2(\text{proton})} > 10^{30} \text{ ans}$ stable, $T_{1/2(\text{neutron})} \sim 15 \text{ min}$
Masse $M_{p,n} \sim 1,7 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
E au repos nucléon $\sim 1 \text{ GeV}$ (10^9 eV , $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$)
vitesse nucléon/c $\sim 21 \%$

Noyau: $A \sim 100$ nucléons, $R \sim r_0 A^{1/3} \sim \text{qqs fm}$
densité nucléaire $\sim 10^{38} \text{ nucléons/cm}^3 \sim 0,1 \text{ nucl/fm}^3$
 $\sim 1,7 \cdot 10^8 \text{ T/cm}^3$!!!!
Masse $M \sim 100 M_{p,n} \sim 1,7 \cdot 10^{-25} \text{ kg}$
énergie au repos noyau $\sim 100 \text{ GeV}$

Electron: rayon 'classique' électron $\sim 2,8 \text{ fm}$
masse électron $9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ soit $\sim 1/1000 M_{p,n}$
énergie au repos $\sim 0,5 \text{ MeV}$

Atome en Å : Taille en Å, $1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m}$
masse atome \sim masse noyau

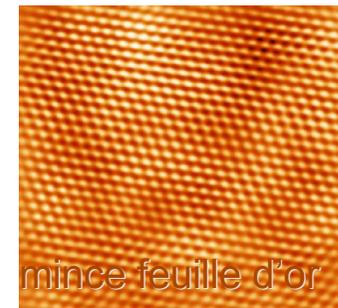
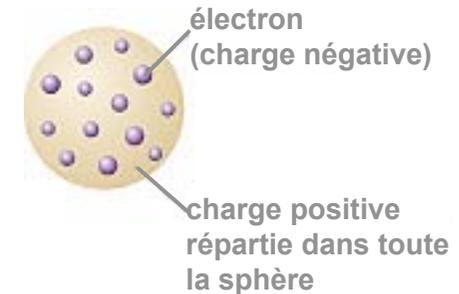
Chap 1 Un noyau:
du classique au quantique
du macroscopique au microscopique
du collectif et de l'individuel
aspect classique

modèle => expérience

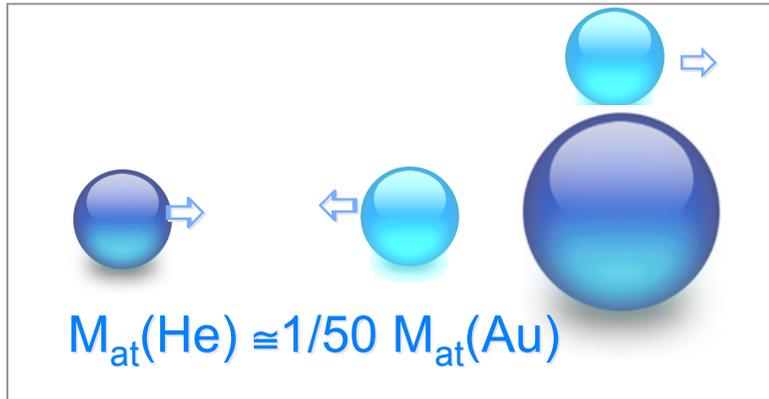
En 1911 l'équipe de Lord Rutherford va réaliser la 1^{ère} expérience de physique nucléaire pour tester le modèle pour l'atome de l'époque dit « plum-pudding »

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 α
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** (6μ , ~ 200 couches d'atomes)



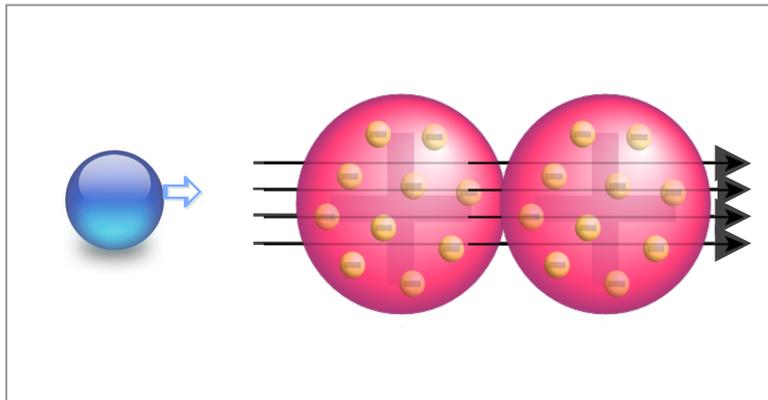
Résultats attendus



Hyp 1: atome ≡ sphère dure neutre

des alphas traversent entre atomes
des alphas sont rétro-Diffusés (sur atomes)

Probabilité de diffusion (ou pas)
 \propto **taille atome** en fait sa section \perp
section efficace σ ($1 \text{ \AA} = 10^{-10}\text{m}$)



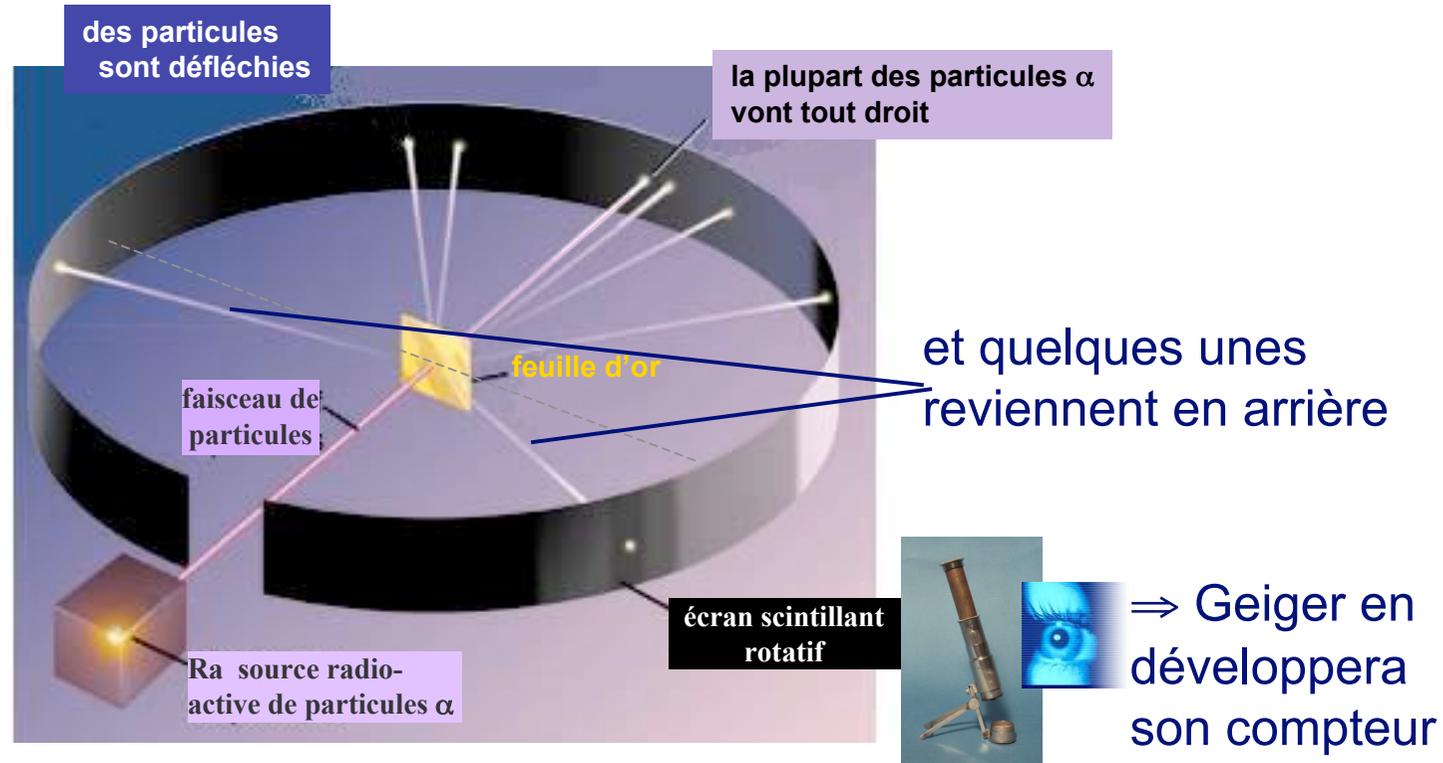
Hyp 2: atome ≡ sphère molle (gelée)

des alphas traversent dans et entre atomes
Certains sont légèrement diffusés par \vec{E} électrons,

Section efficace diffusion (probabilité diffusion)
 $\sigma \propto Z \times$ **dimensions électron** ($80 \text{ fm} \sim 10^{-13}\text{m}$)

alpha diffusés: $N_{\text{Thomson}} \propto$ dimensions électron $\ll N_{\text{sphère dure}} \propto$ dimensions atome
 \Rightarrow **distinction possible : nombres alphas transmis/diffusés et angle (180 ou petit)**

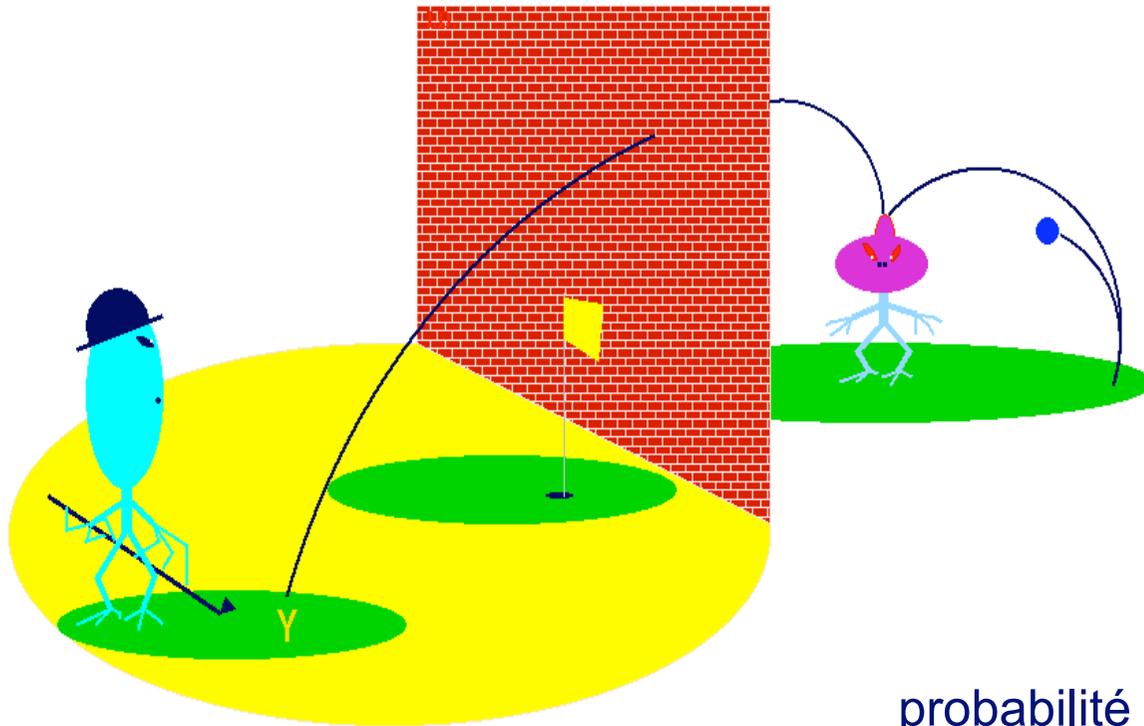
expérience



⇒ ne correspond à aucun des 2 modèles:

Il y a des particules rétro-diffusées **ET** des des particules 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

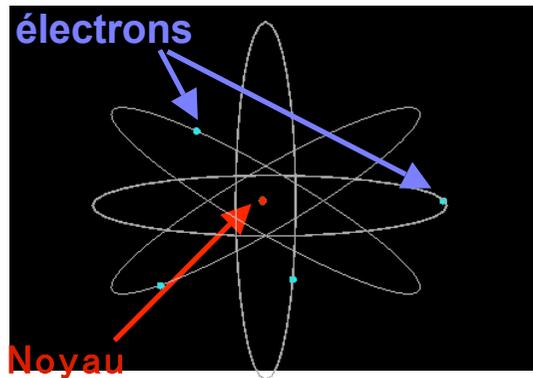
\Rightarrow il y a un très petit objet au centre de l'atome, très dense et chargé positivement : le NOYAU.

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

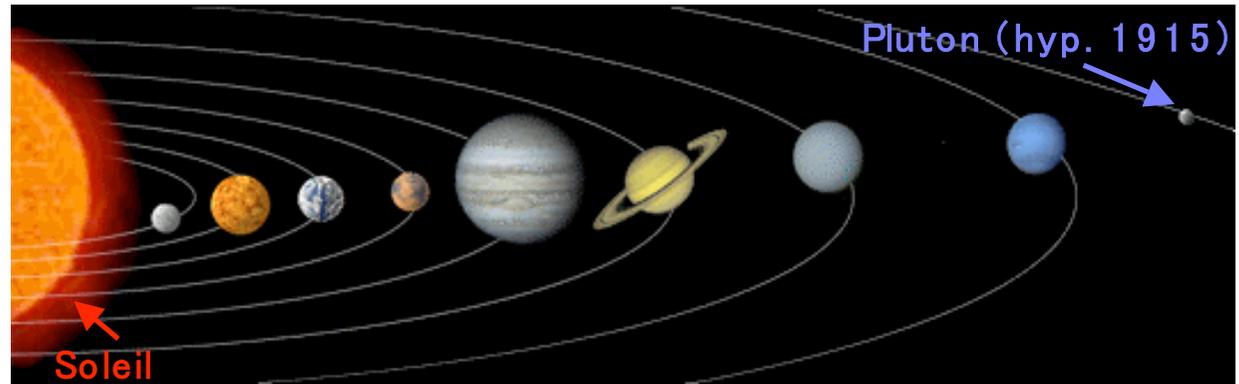
\Rightarrow nouveau modèle (classique, 1911)

modèle planétaire : l'atome \cong le système solaire
1 objet central foyer des orbites des objet 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 ($1\text{\AA} = 10^{-10}\text{m}$)

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

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

densité noyau = 1.7×10^8 tonnes/cm³ \gg densité moyenne Soleil = 1,4 tonnes/m³

Pourquoi un modèle classique ?

En 1911 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

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

10 ans plus tard: la notion de particule en tant que pur objet ponctuel faiblira...

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

\Rightarrow caractère ondulatoire, non négligeable qd λ a les dimensions de l'objet

Ex:

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

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

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

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

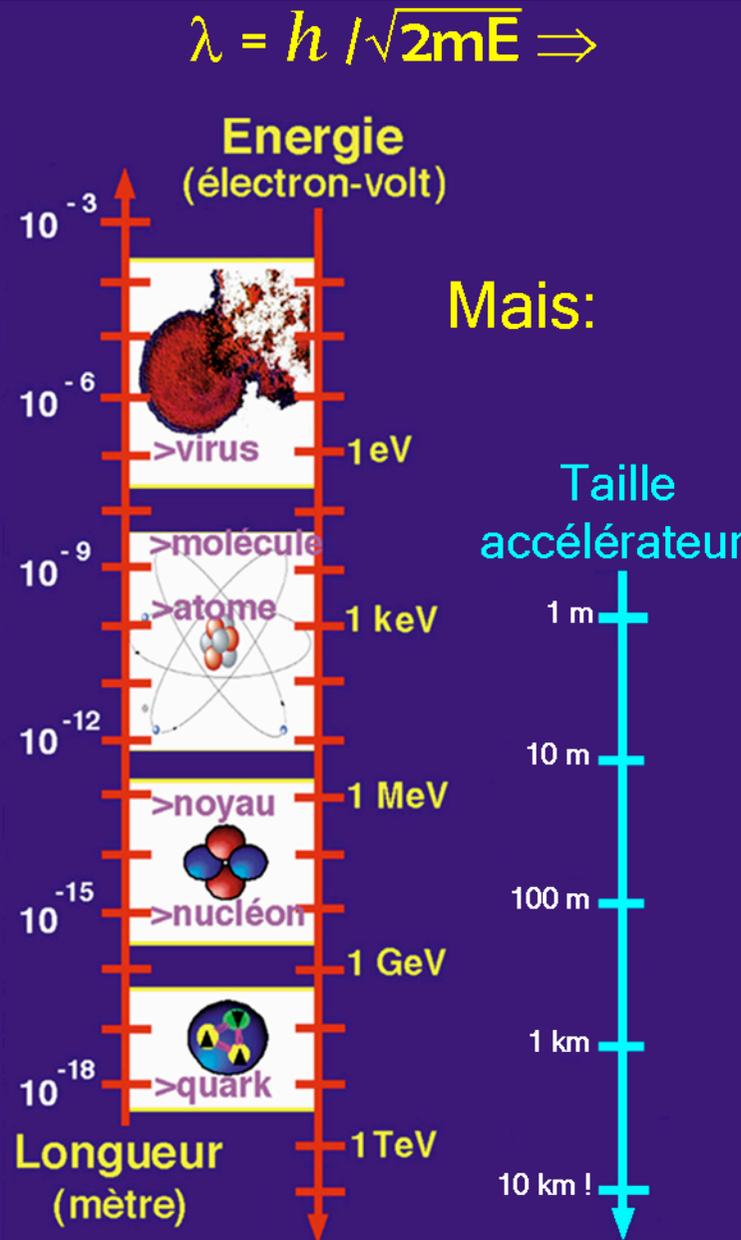
D'où la course à l'énergie



Microscope électronique



Accélérateur linéaire (SLAC)



Cyclotron (AGOR)



Synchrotron (LHC)

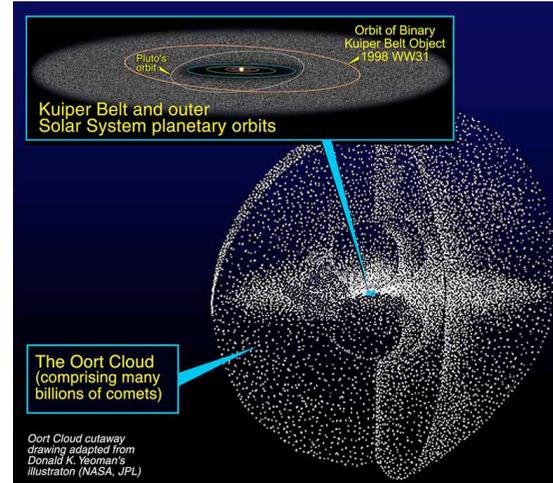
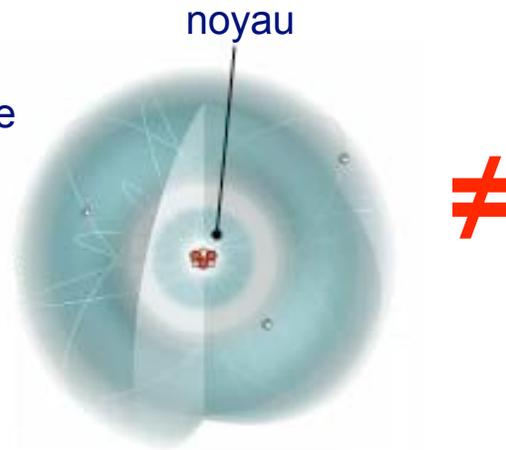
Pourquoi un modèle classique ?

quant à la vision probabiliste ...(c'est 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:

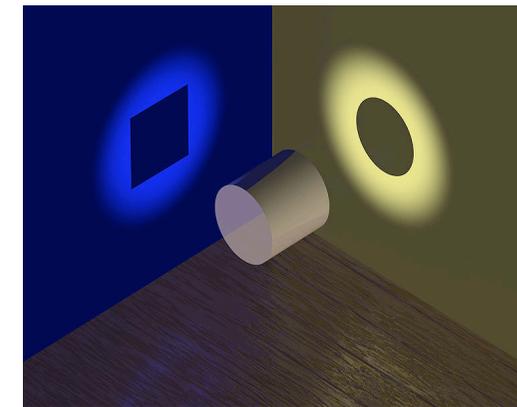
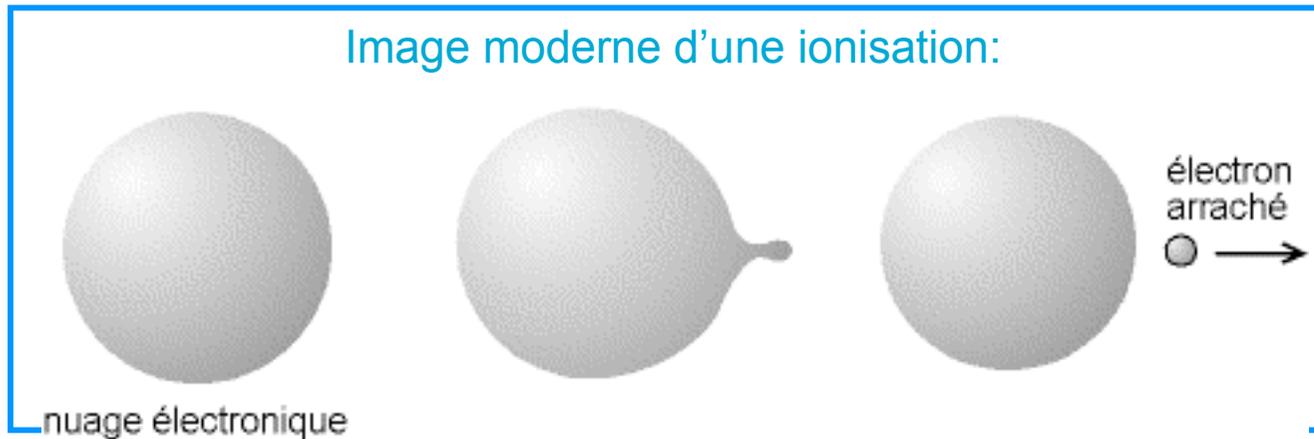


Image de dualité classique

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,
2: 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

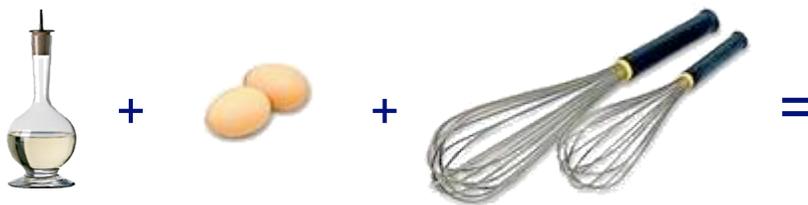
1932 : le **neutron** (Chadwick) **particule pas doublet**, N neutrons dans noyau

Noyau = ${}^A_{Z}X_N$ 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)
qui 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//fr/boutique/produits/sim-bouteille_pili.html

mayonnaise: 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 β^- (émission d' e^- , e^+),
alpha et gamma

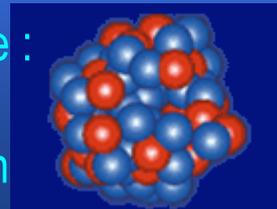
1930 : Pauli hyp pour $\beta^- \Rightarrow$ particule indétectable le neutrino de masse nulle

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

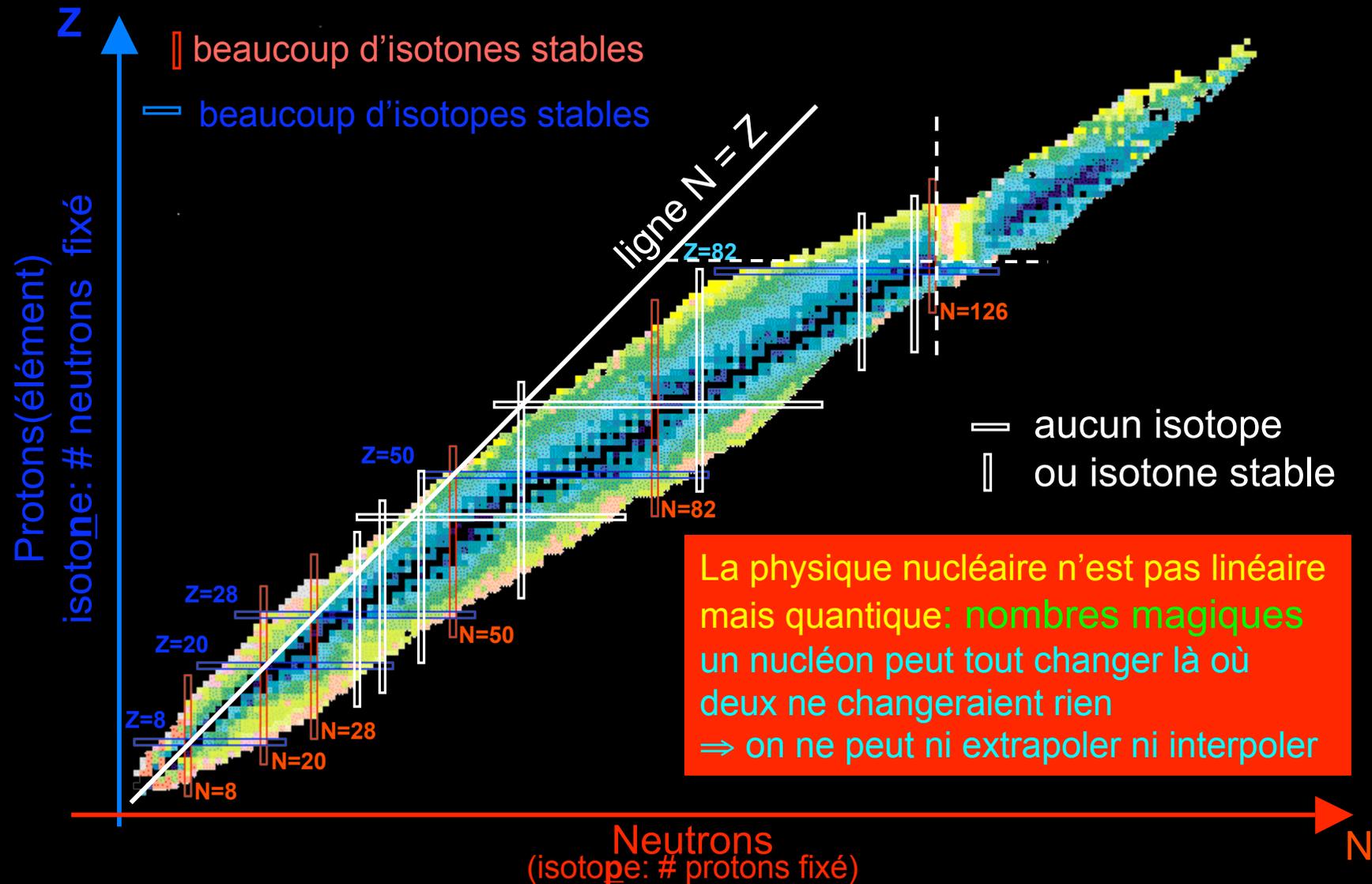
⇒ il faut les CREER

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

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

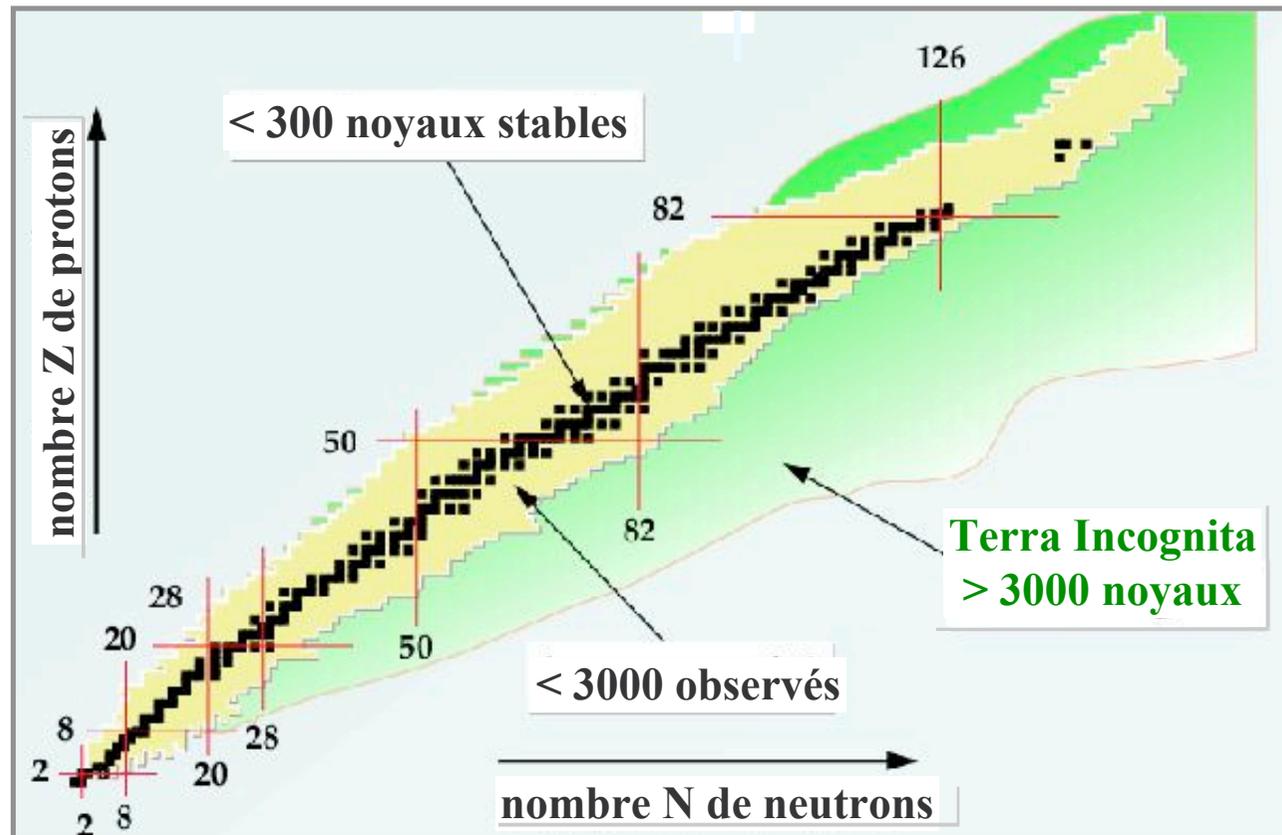
Nécessité des expériences
sur accélérateurs....

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 ?

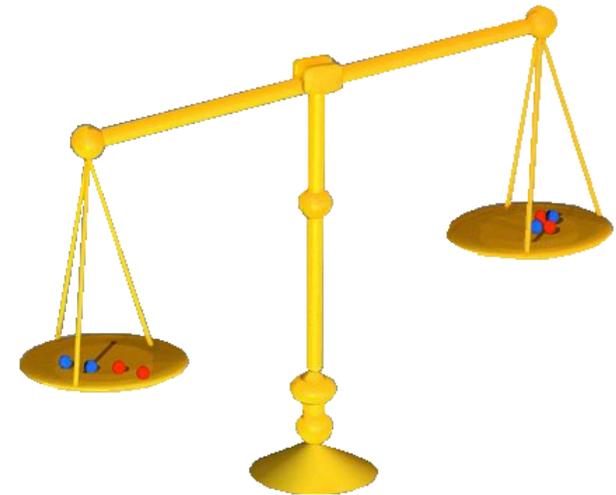
⊗ que se passe-t-il quand on lui fournit de l'énergie (ou excitation)?

⇒ 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 manquante ? **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 qqs 10^{-19} J \Rightarrow négligeable au quotidien

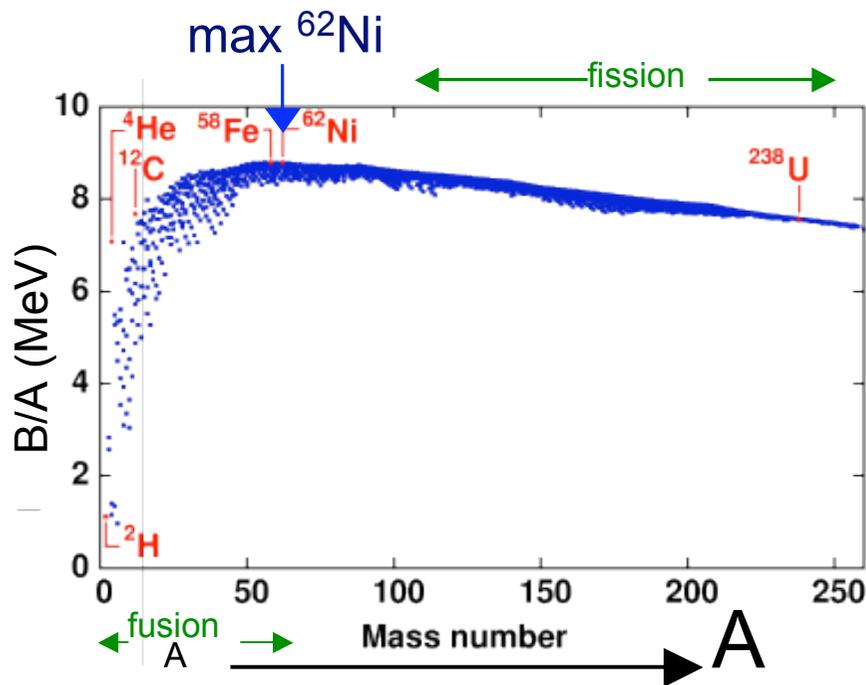
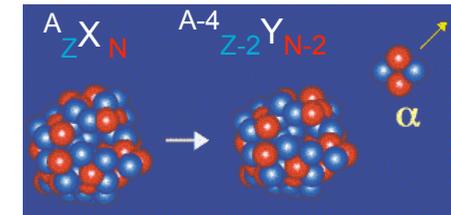
c'est B qui permet les noyaux stables (durée de vie \sim âge de l'univers, ou proton)

Energie de liaison et stabilité

Condition nécessaire d'une décroissance

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

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



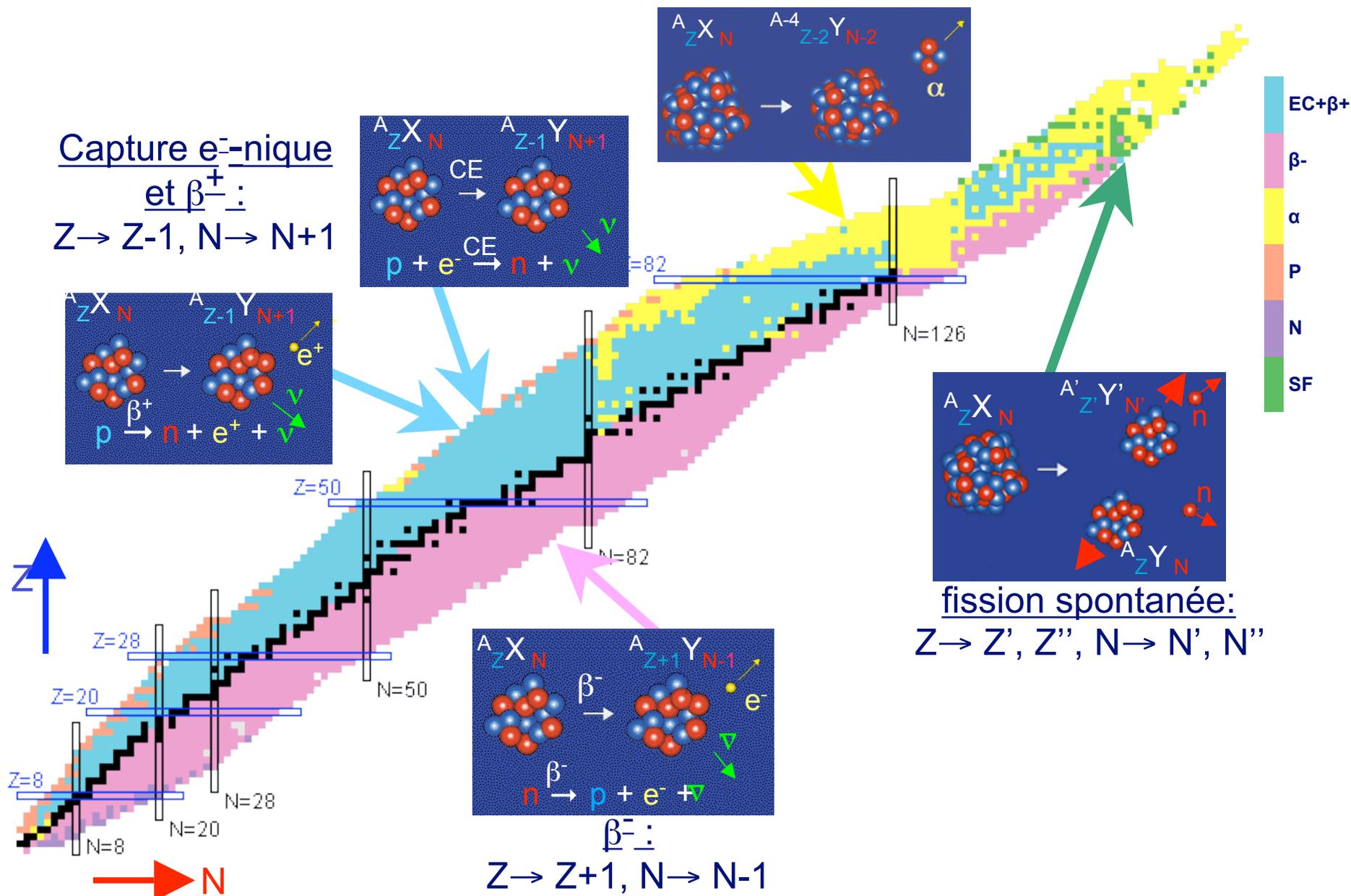
Ex radioactivité α (${}^4_2\text{He}$):

$$\begin{aligned} Q &= Nm_n c^2 + Zm_p c^2 - B(N, Z) \\ &\quad - (N-2)m_n c^2 + (Z-2)m_p c^2 - B(N-2, Z-2) \\ &\quad - 2m_n c^2 - 2m_p c^2 - B({}^4\text{He}) \\ &= B(N-2, Z-2) - B(N, Z) + B({}^4\text{He}) \\ &= B(\text{Fils}) + B(\alpha, \beta, p, n, \dots) - B(\text{Père}) \\ &\Rightarrow \text{zone favorable à radioactivité } \alpha \\ &\quad B(N-2, Z-2) - B(N, Z) \geq 0 \\ &\Rightarrow B(A-4)/(A-4) \geq B(A)/A \\ &\quad (A/(A-4) \sim 1 \text{ si } A \text{ gd}) \end{aligned}$$

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

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

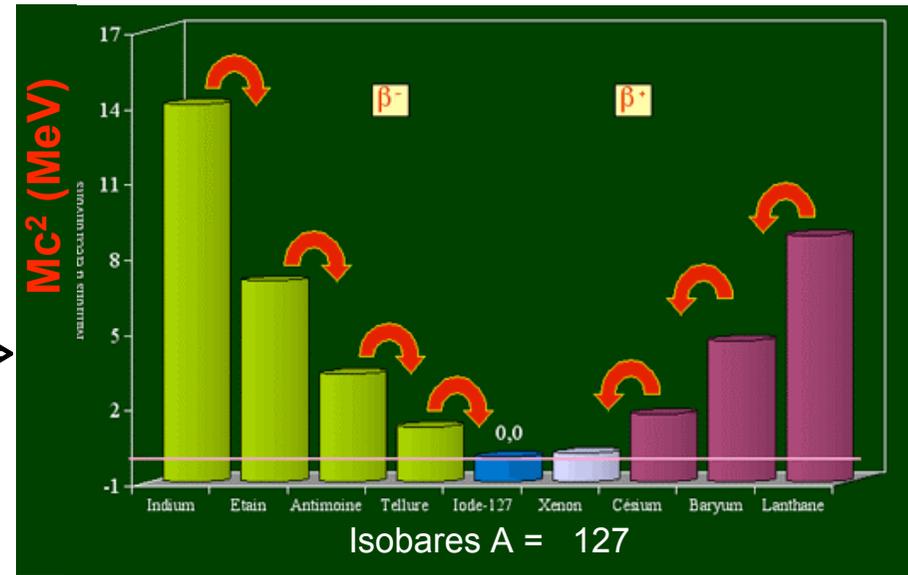
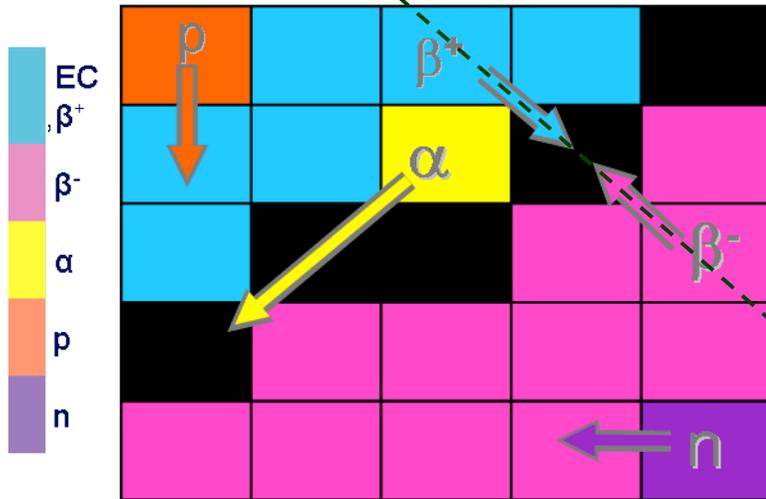
Energie de liaison et stabilité



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

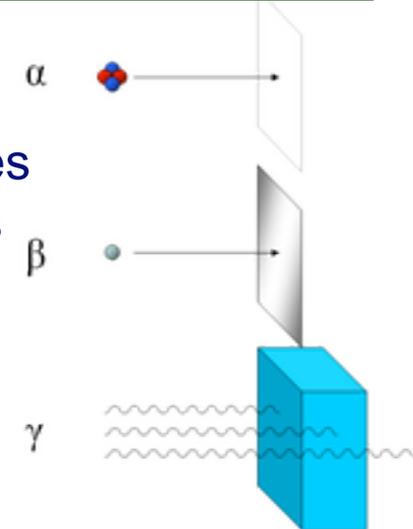
radioactivités à partir de : http://www.astrosurf.com/m80/documents/conférences_robert/basesnuclear.ppt

"Vallée" de stabilité



La radioactivité α c'était tonique alors on prenait du radium en pilules...

Distinction entre eux
phénoménologique :
Radioactivités observées
souvent accompagnées
d'un rayonnement
appelé γ (après α et β)
(et dont il sera question
plus tard)



Décroissance radioactive

Quantité de noyaux d'un élément X radioactif (α , β^\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 λ constante radioactive ou probabilité par unité de temps qu'un noyau se désintègre)

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

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

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

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

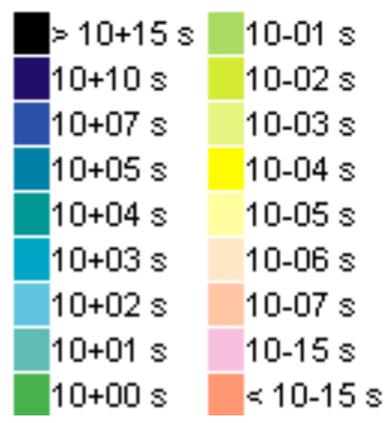
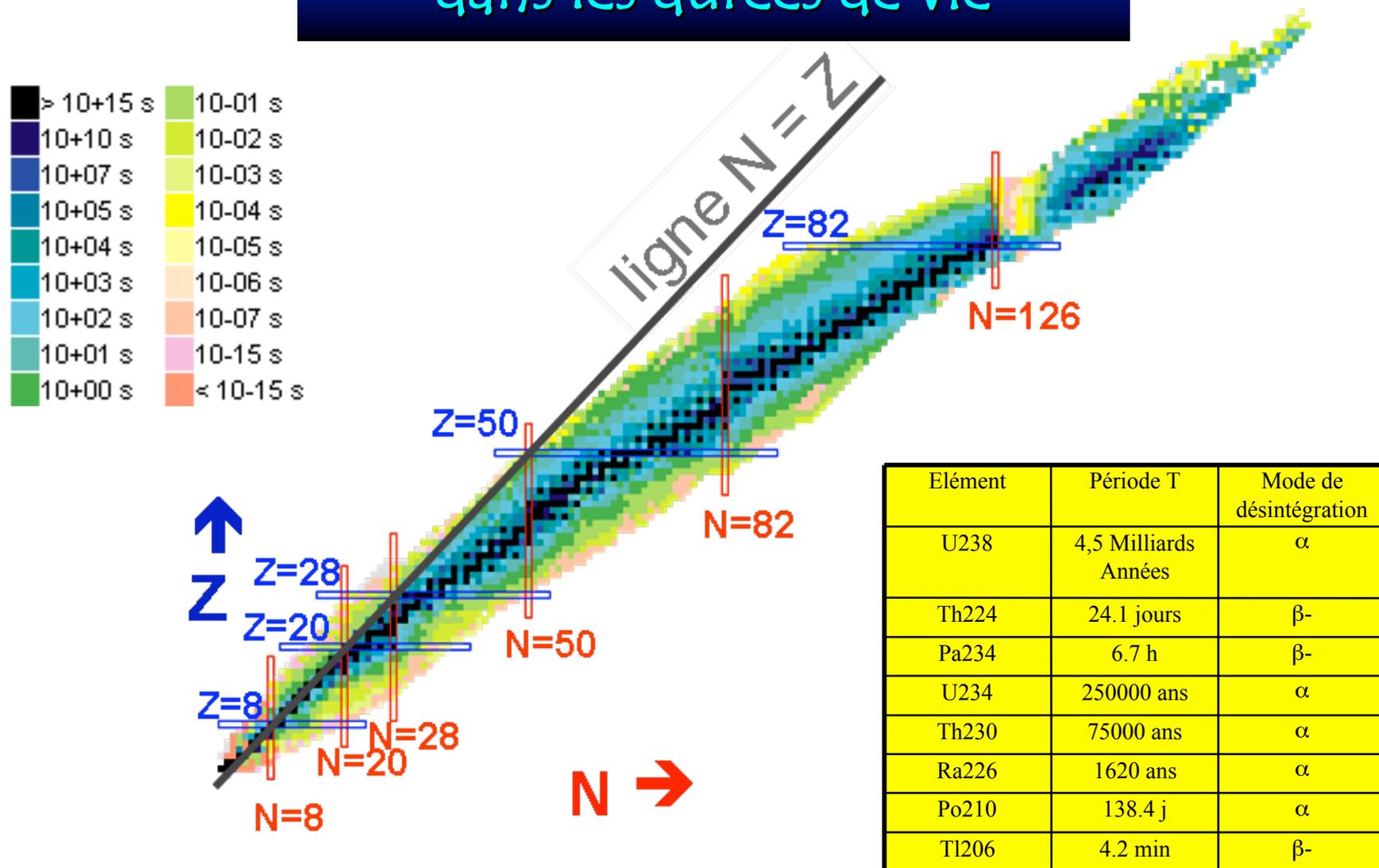
Nombre de désintégrations par unité de temps = $\mathcal{A}(t)$ l'activité = $\lambda N(t)$

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

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

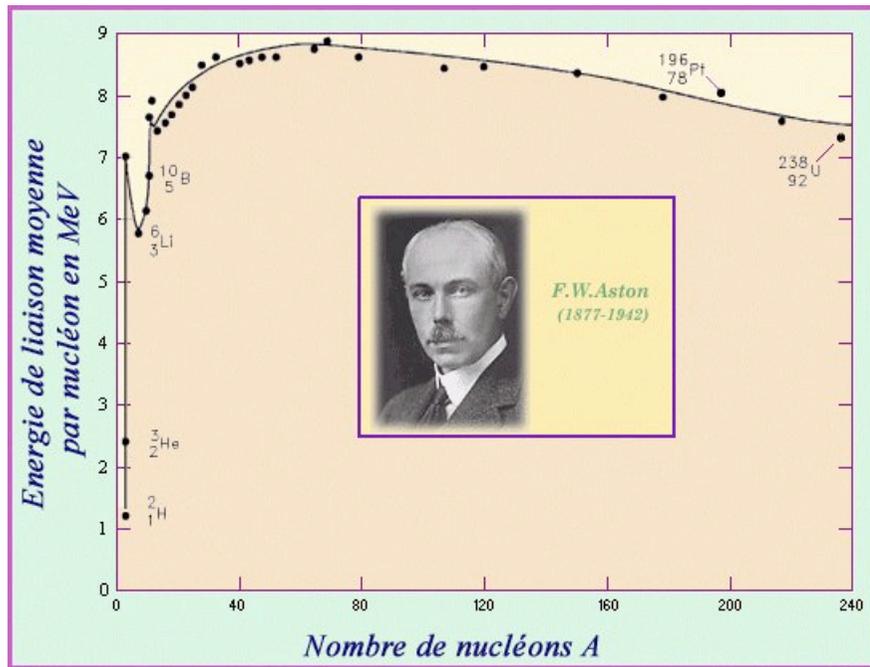


Elément	Période T	Mode de désintégration
U238	4,5 Milliards Années	α
Th224	24.1 jours	β^-
Pa234	6.7 h	β^-
U234	250000 ans	α
Th230	75000 ans	α
Ra226	1620 ans	α
Po210	138.4 j	α
Tl206	4.2 min	β^-

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

exemples : 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):

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

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))

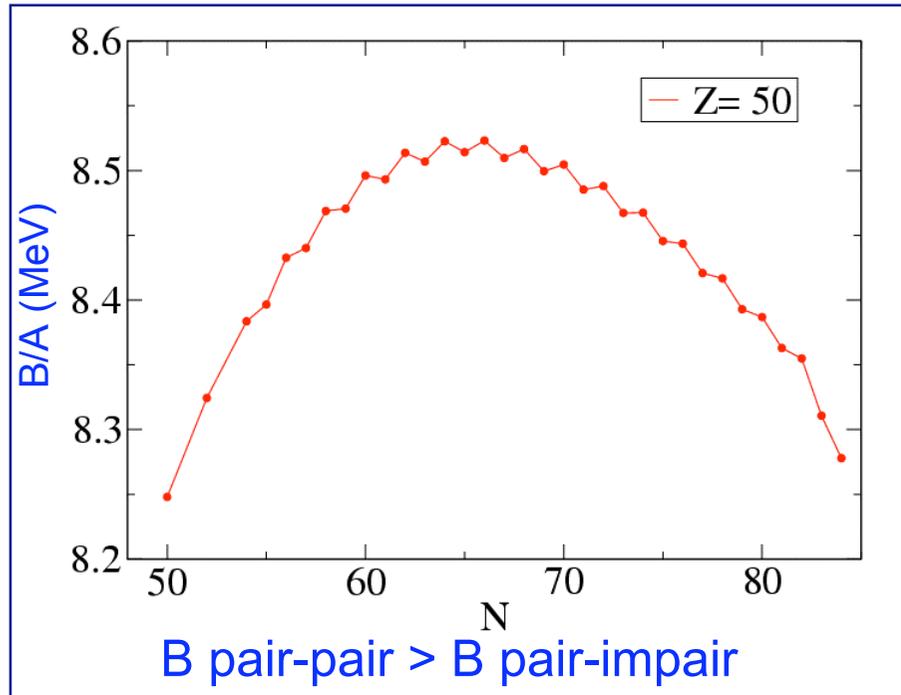
Rq : si $|N-Z|$ trop grand $B \leq 0$: émission spontanée proton, neutron

terme d'appariement

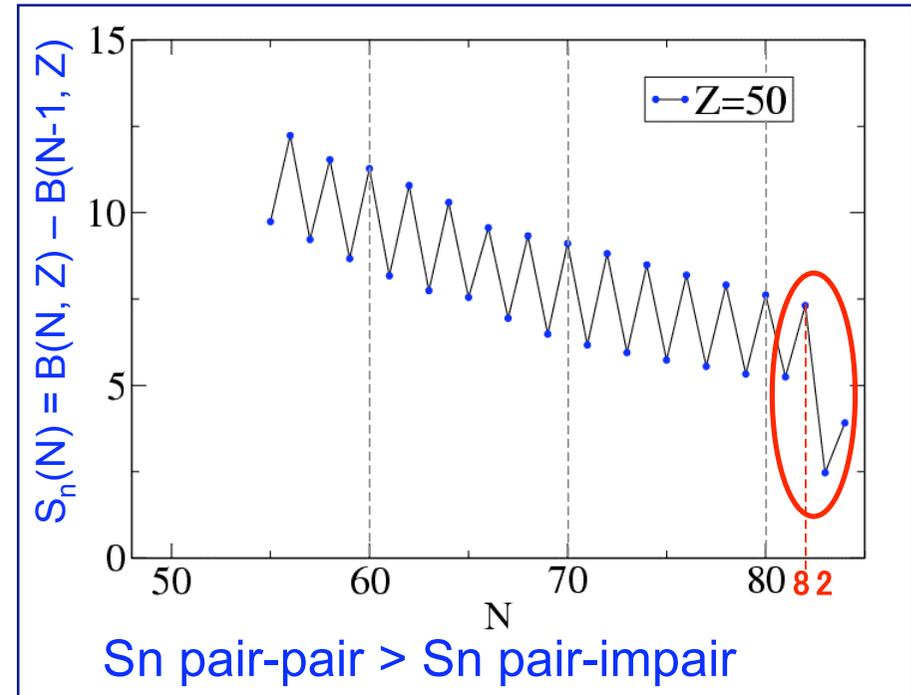
Effet d'appariement

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

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



⇒

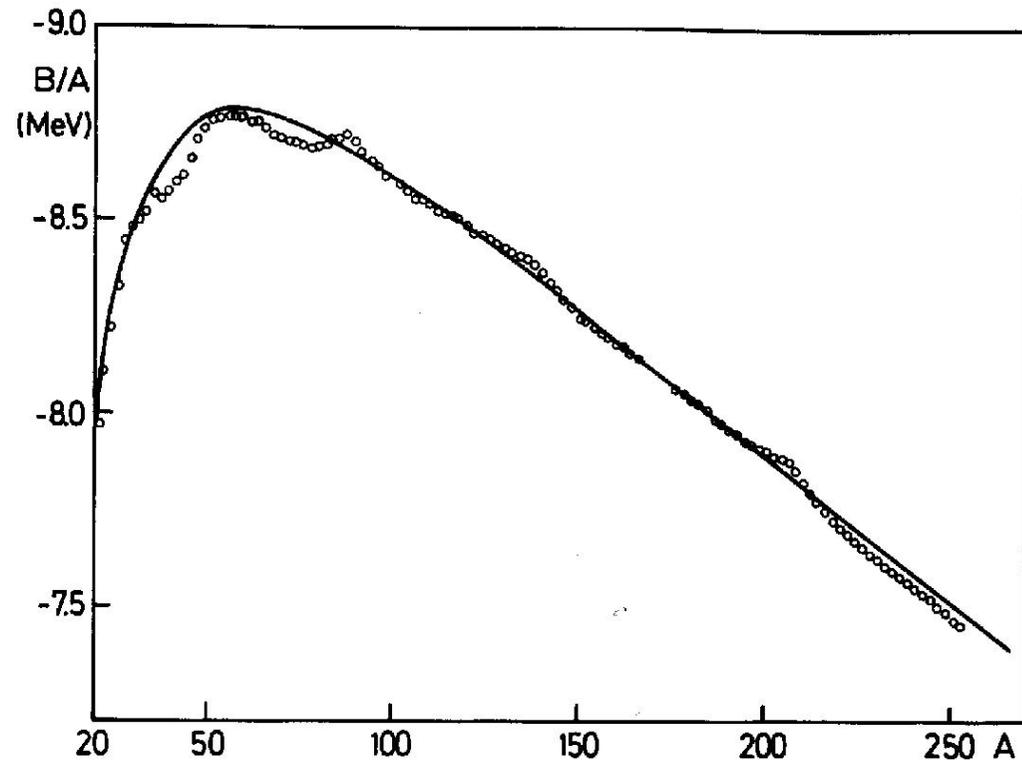


S_n est l'énergie de séparation d'1 neutron, car nécessaire pour libérer le "dernier" neutron

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 :

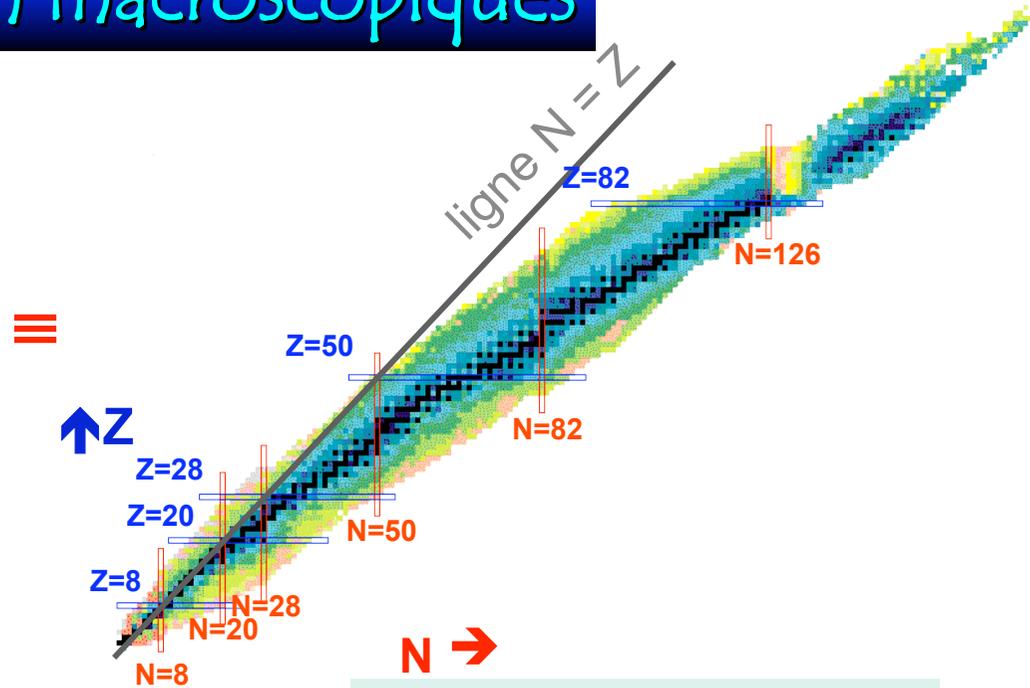
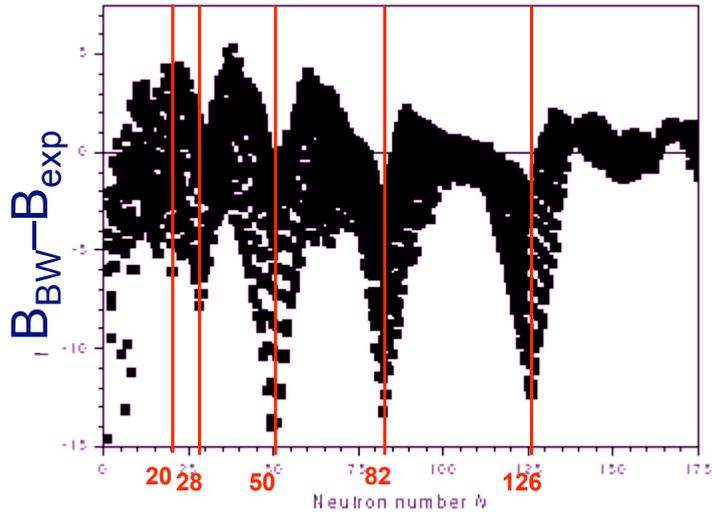


- valeurs expérimentales
- courbe calculée avec formule goutte liquide

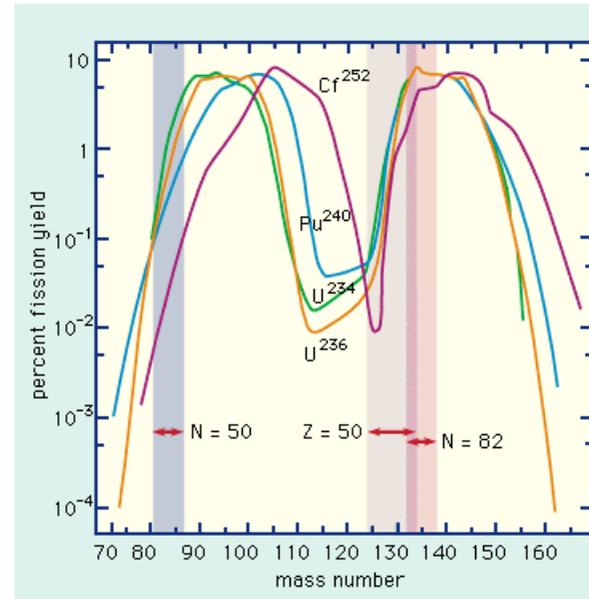
Figure 1.2. Experimental values of B/A for β -stable odd- $A(o)$ nuclei and the calculated curve using a mass formula similar to Eq. (1.4). (From [Ho 75].)

en plus donne explication de la fission
MAIS...

Effets non macroscopiques



fission spontanée de AX :
 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 Bexp-Bth : 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 α :

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

émission $\alpha \Leftrightarrow$ fusion avec un α

D'où

fusion spontanée impossible \Leftrightarrow répulsion coulombienne des noyaux

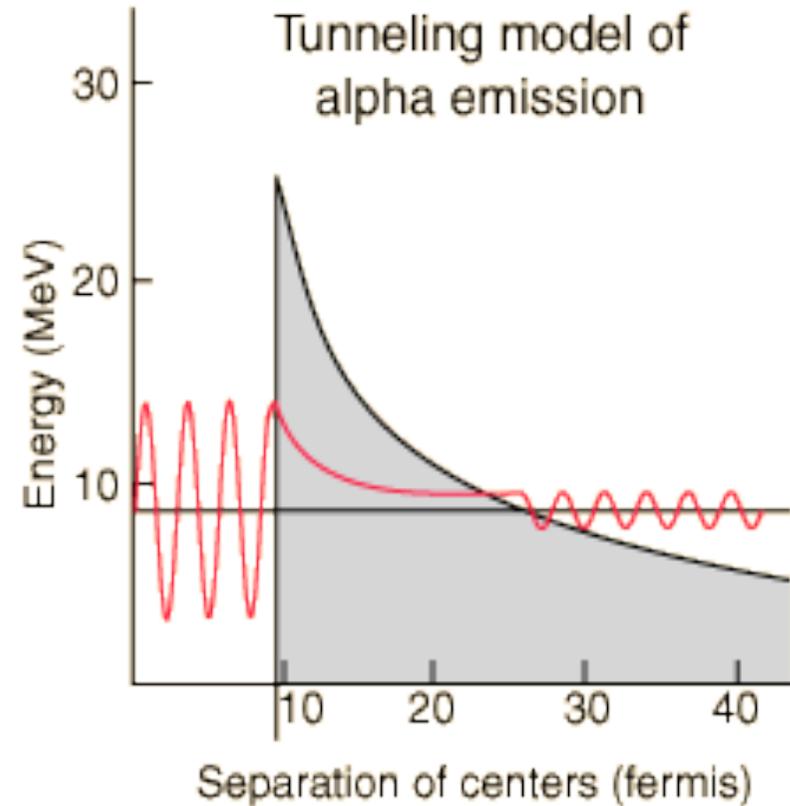
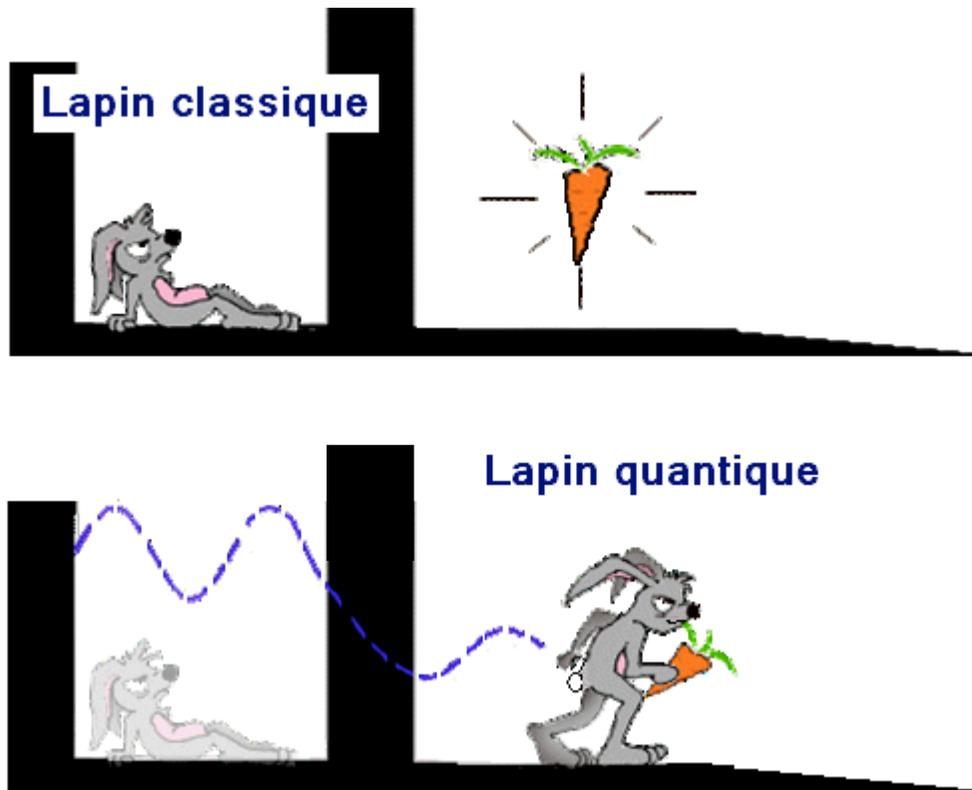
\Leftrightarrow émission α spontanée impossible

Mais : classiquement barrière trop haute

\Rightarrow effet quantique de traversée de barrière : effet tunnel

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

Impossible n'est pas quantique



⇒ 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

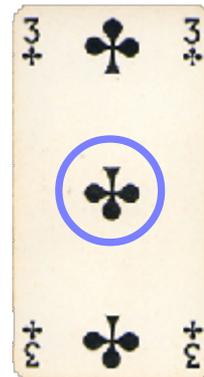


$s = 2$



$s = 1$

\neq
 \curvearrowright
 180°



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

Et si nucléons comme électrons ???...

\Rightarrow modèle du gaz d'électrons libres dans un métal

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⁻, 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 :

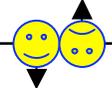
En cas de problème difficile, impossible à résoudre en l'état \Rightarrow utiliser et justifier des approximations

Application du gaz de Fermi au noyau

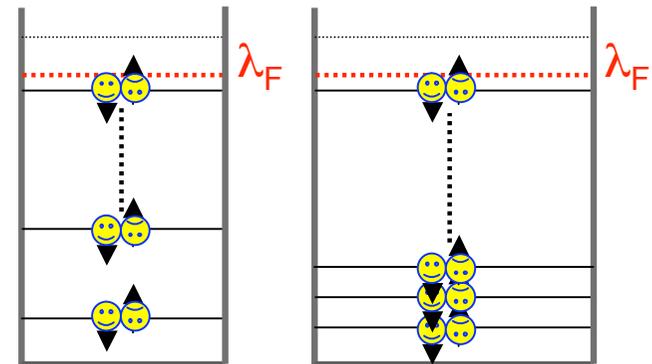
approximation du gaz:

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

Approximation puits carré

on remplit les 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 λ_F appelé **niveau de Fermi** dont énergie ε_F ne dépend que de la densité (id pour ts les noyaux).
⇒ hauteur du puits constante ($\varepsilon_F + 8\text{Mev}$)

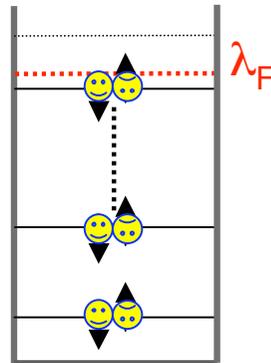


⇒ Si $A \nearrow$, volume noyau (de la boîte) \nearrow ,
mais profondeur $c^{\text{ste}} \Rightarrow$ les états quantiques se resserrent
Chgt forme puits \Leftrightarrow espacement états quantiques change

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
(d'où pas de son dans le vide)

Au crédit du modèle de gaz de Fermi

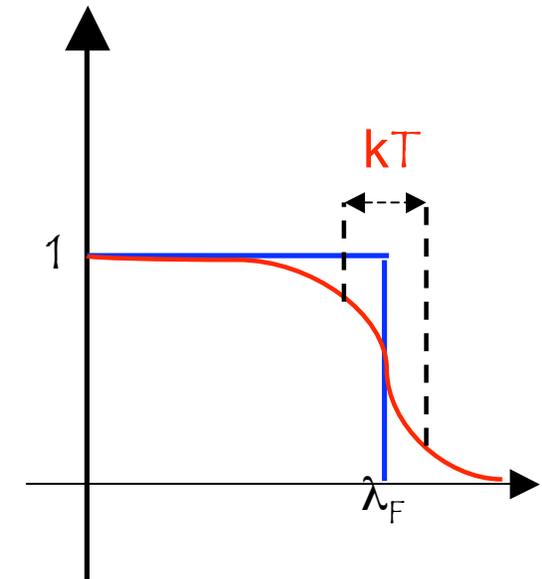
- permet de justifier et de retrouver les paramètres du modèle de goutte liquide
- donne des résultats en accord avec expérience:
(profondeur du puits \Leftrightarrow densité cste \Leftrightarrow saturation)
- plus satisfaisant intellectuellement

Mais

Chgt dans la notion de température/goutte liquide

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

Dans un noyau (gaz quant.) seuls les nucléons proches du niveau de Fermi peuvent être excités par augmentation de T...diffusivité (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 abrupts.....

potentiel plus adapté

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

(oscillations) vibrations de pulsation ω

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

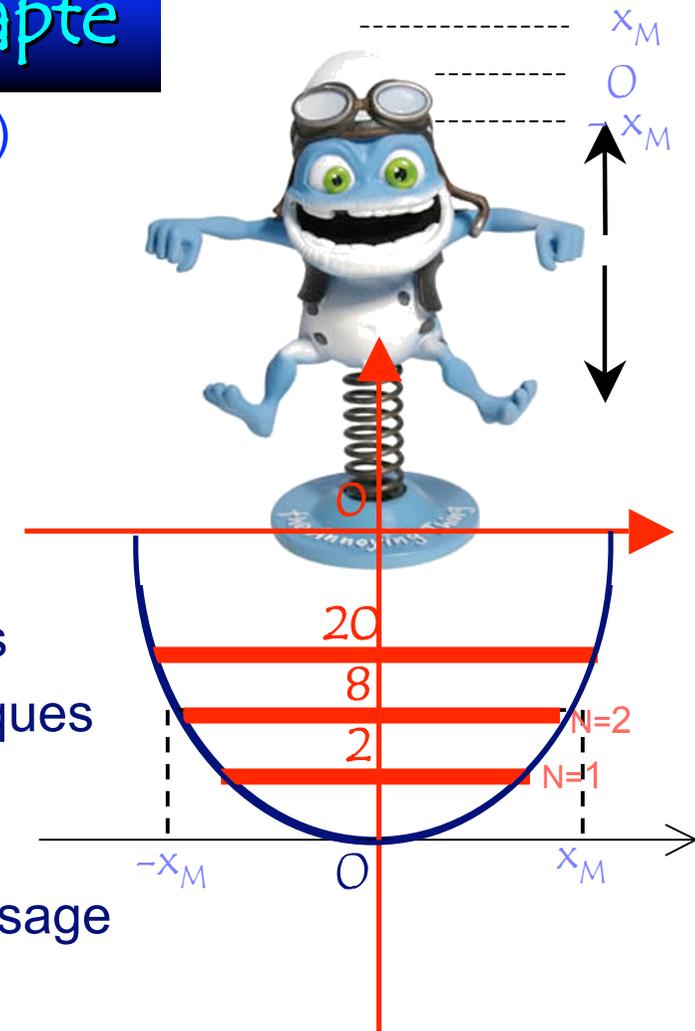
entre couches des espaces \Leftrightarrow nombres

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 ?

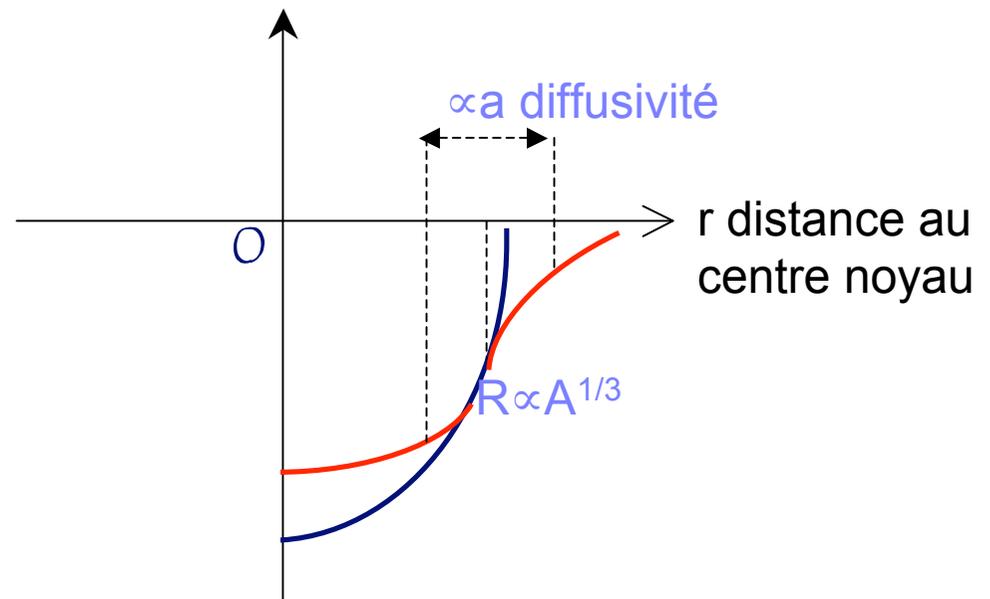
deux raisons pour cela : surface diffuse à T non nulle, rôle boîte dans
espacement niveaux



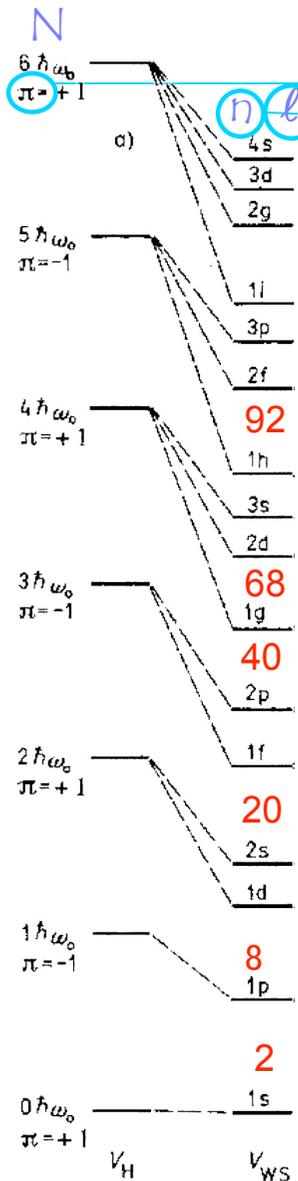
Travaillons la forme du puits

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

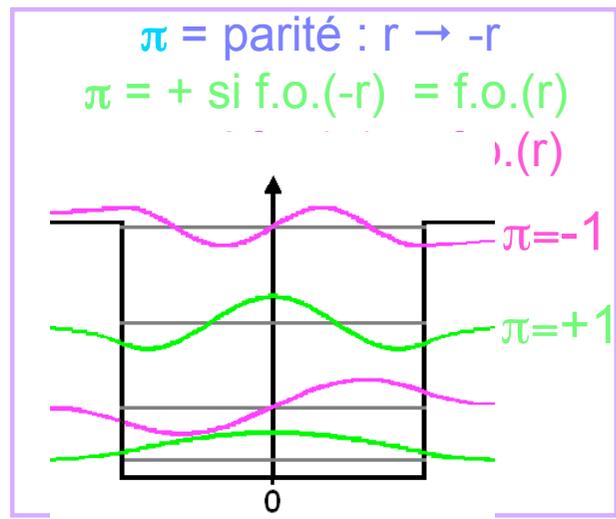
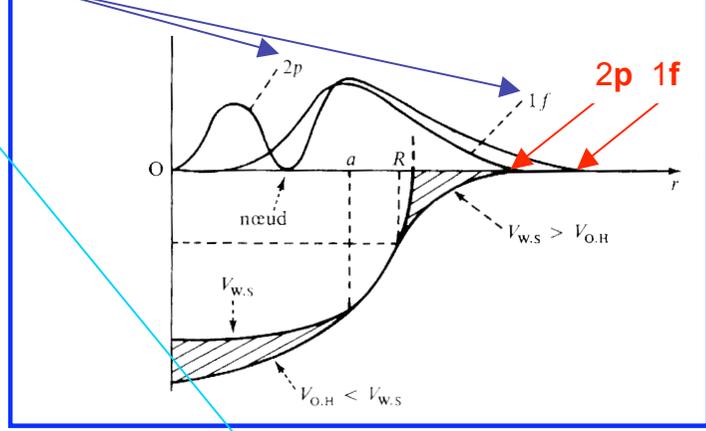
Woods-Saxon:
bord diffus mais même volume



potentiel de Woods-Saxon



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



l : # quantique azimutal 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
 ➤ \sim 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: (inspirateurs e⁻)
 Interaction spin-orbite, électrons $s = 1/2$,
 ⇒ moment magnétique
 ⇒ énergie qd interaction entre \vec{B} issu de leur mvt dans \vec{E} des protons du noyau

Appliquée en physique nucléaire

M. Goppert-Mayer (1948) nucléons $s = 1/2$

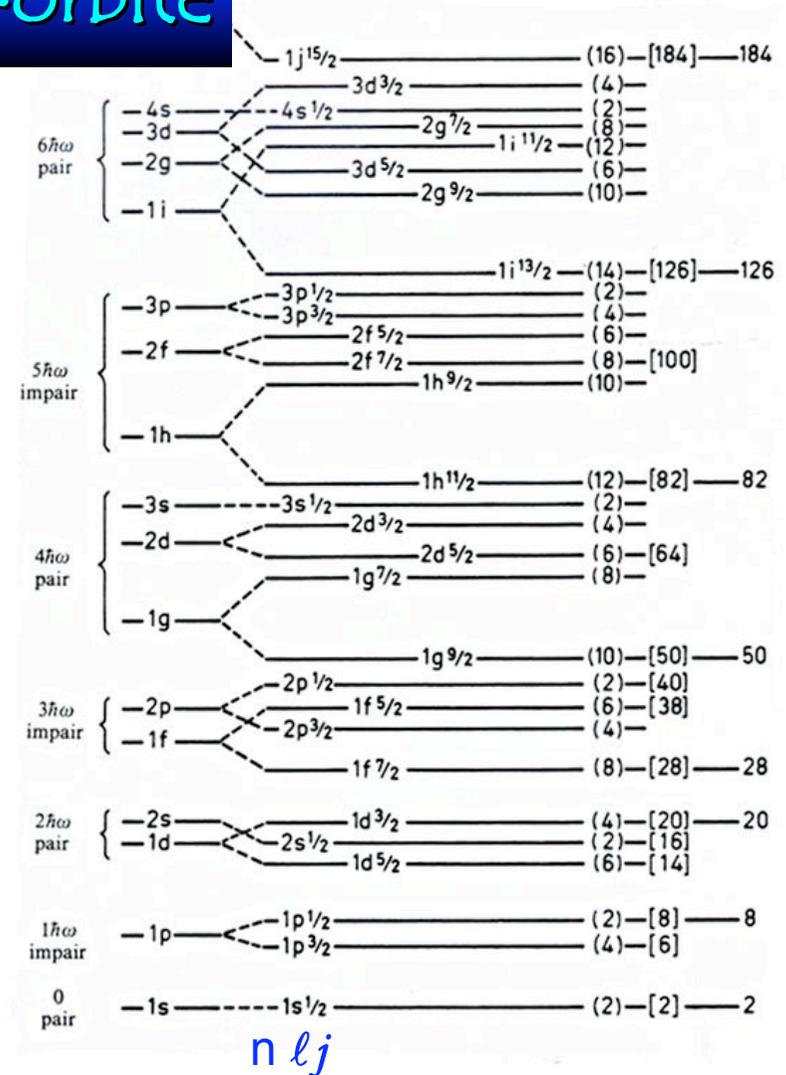
⇒ ajout d'un terme de spin-orbite

Résultat : **CA Y EST !**

Rq : Terme spin-orbite nucléaire

même ordre que potentiel moyen

⇔ pas même origine que celui e⁻ de l'atome
 (mais origine dans nucléon-nucléon)

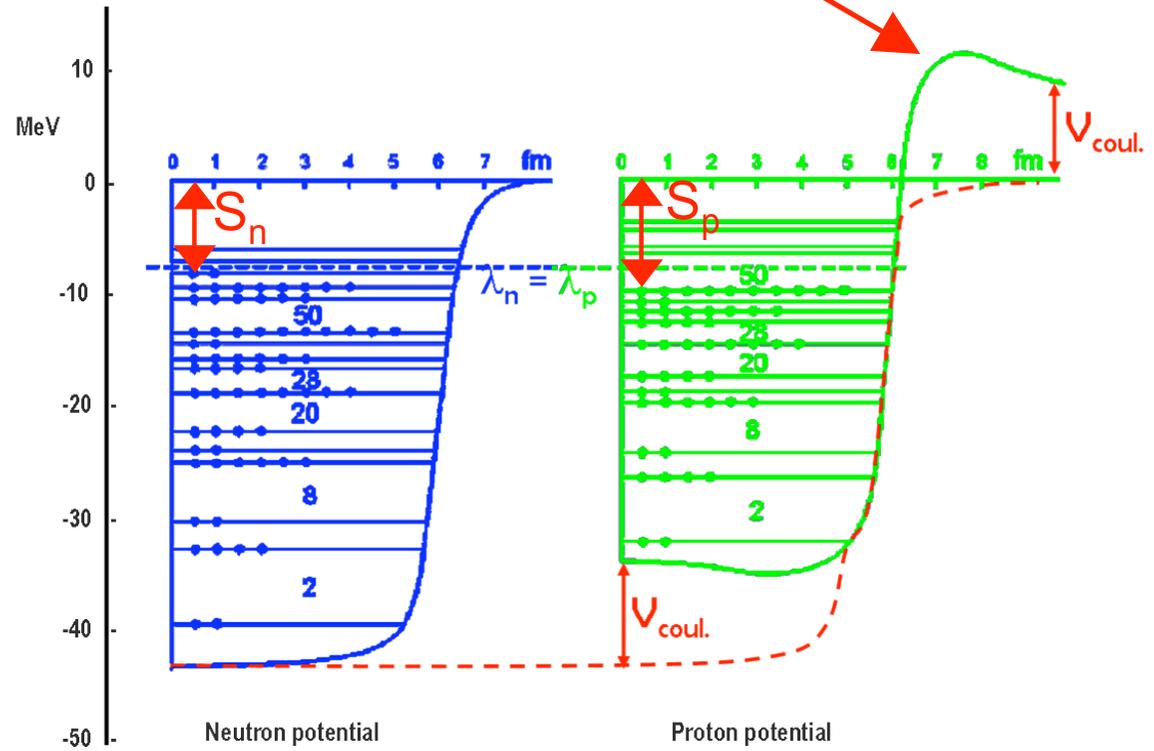


sous-couche séparées en n, l, j
 $j = "l + s"$ moment angulaire total
 (2j+1) nucléons dans 1 sous-couche n l j

Modèle en couches sphérique

côté protons: il faut ajouter le potentiel coulombien V_{coul} (répulsion électrique)
 \Leftrightarrow les couches proton et neutron éloignées
(Rq: V_{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.

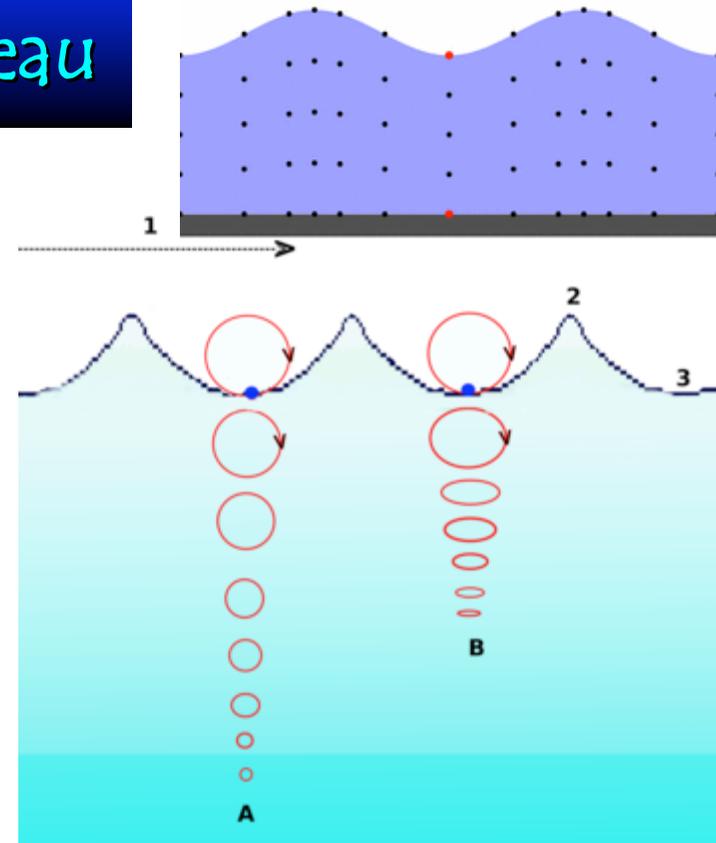


The ^{116}Sn neutron and proton shell structure in the potential well. (According to S. G. Nilsson)

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

Quantique:

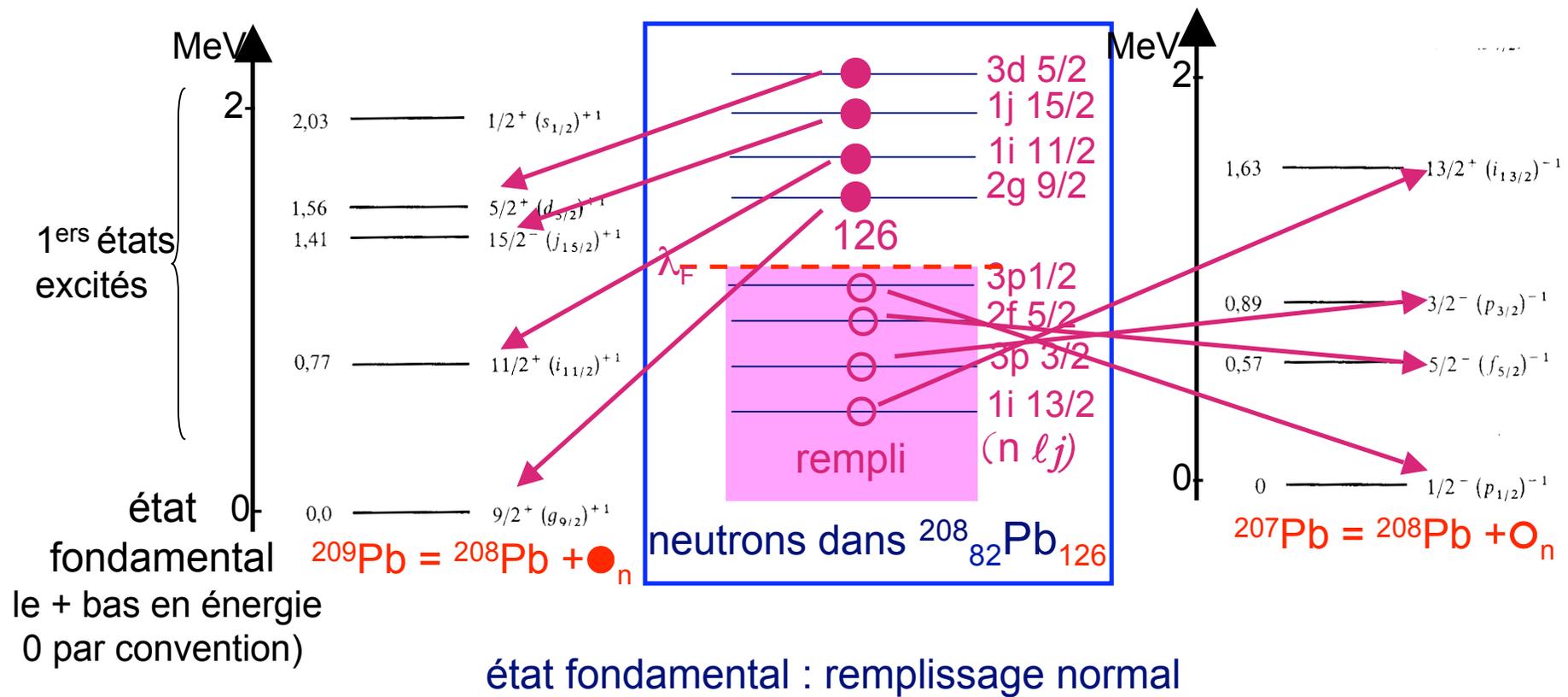
Σ mvts nucléons dans états individuels dans noyau
⇒ 1 onde \equiv 1 noyau dans 1 état quantique (global)
⇒ Autant de configurations autant d'états...

Schéma de niveaux noyaux sphériques impairs

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

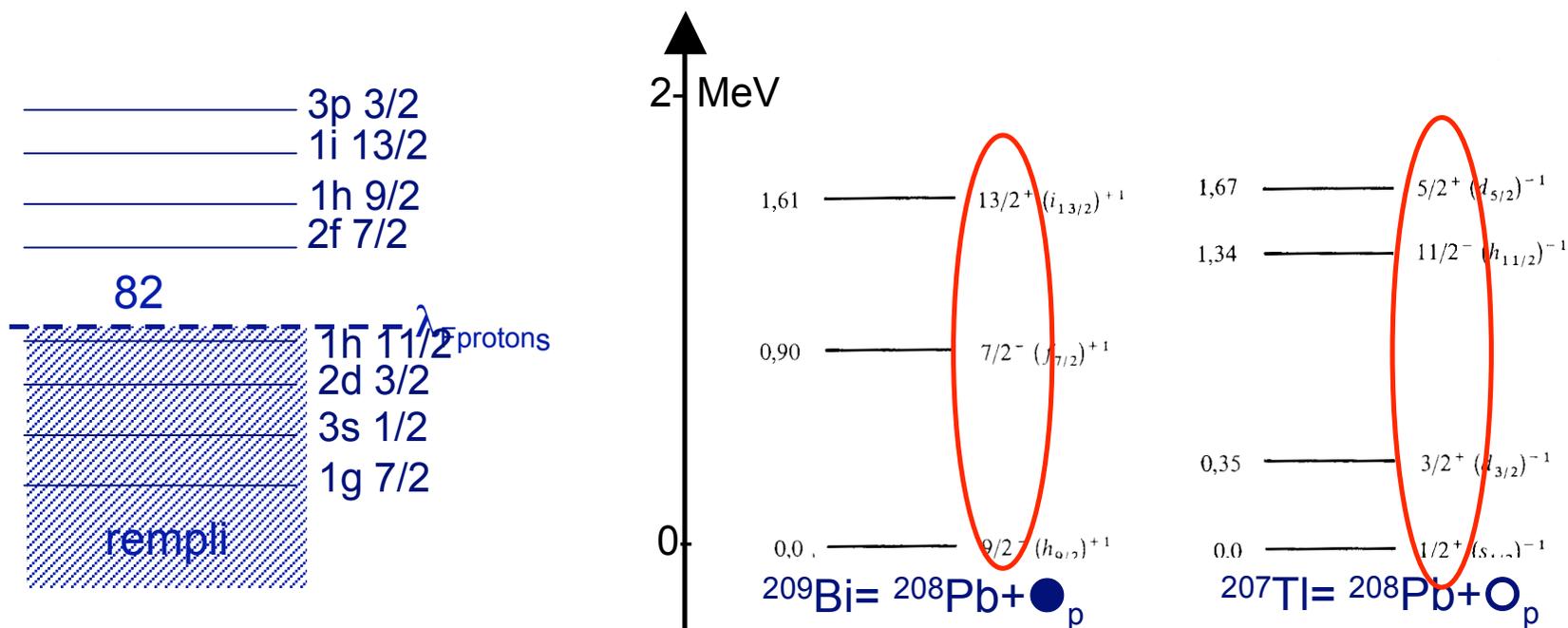
excitation \leftrightarrow
 \uparrow nucléon célibataire
 $j_{\text{nucléon}} = J \text{ noyau}$

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



Mais déjà en protons ça marche moins bien

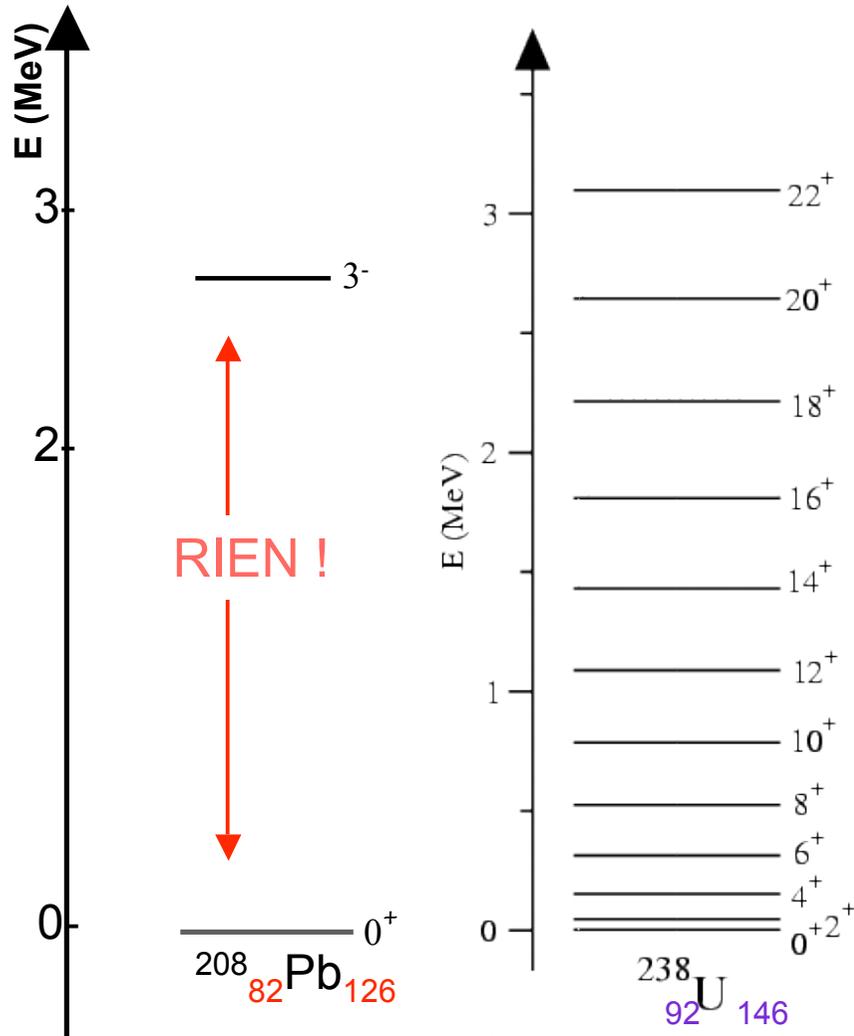
Autour du doublement magique $^{208}_{82}\text{Pb}_{126}$: en protons



pas le bon ordre !!!!!

Les noyaux magiques , de bons 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:

$$\begin{aligned} \text{Noyau}_{\text{p-p}} &= \text{Noyau}_{\text{p-i}} + \text{nucléon} \\ &= (\text{Noyau}_{\text{p-p}} + \text{nucléon}) + \text{nucléon} \\ \Rightarrow J_{\text{Noyau p-p}} &= 0 + j_{\text{célibataire}} + j'_{\text{célibataire}} \equiv 0 \\ &\text{si } j_{\text{célibataire}} + j'_{\text{célibataire}} = 0 \end{aligned}$$

\Rightarrow les nucléons se lient en paires \downarrow

\Leftrightarrow APPARIEMENT (gain de liaison)

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

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

Déformation : retour à la goutte liquide

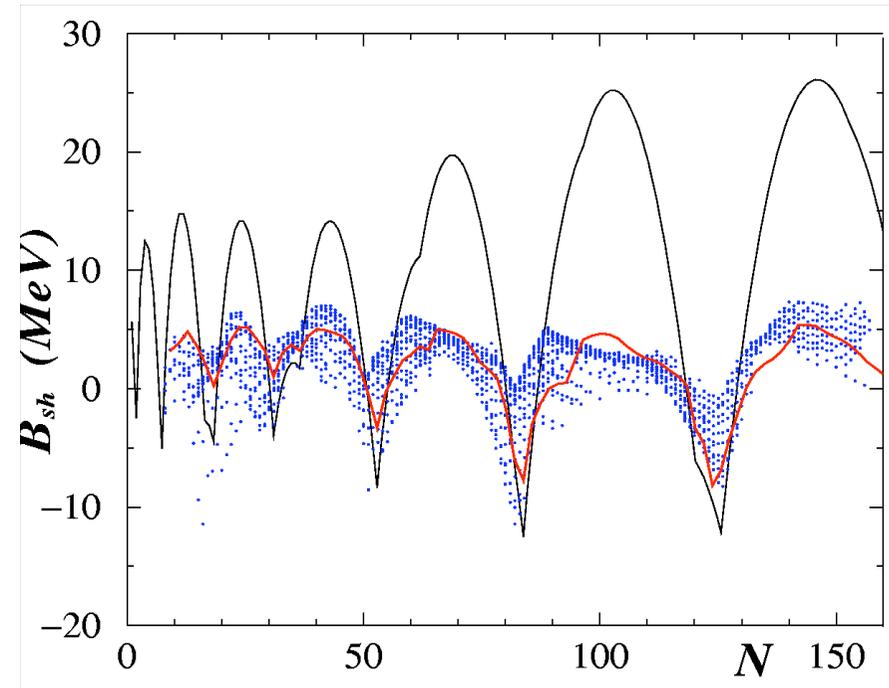
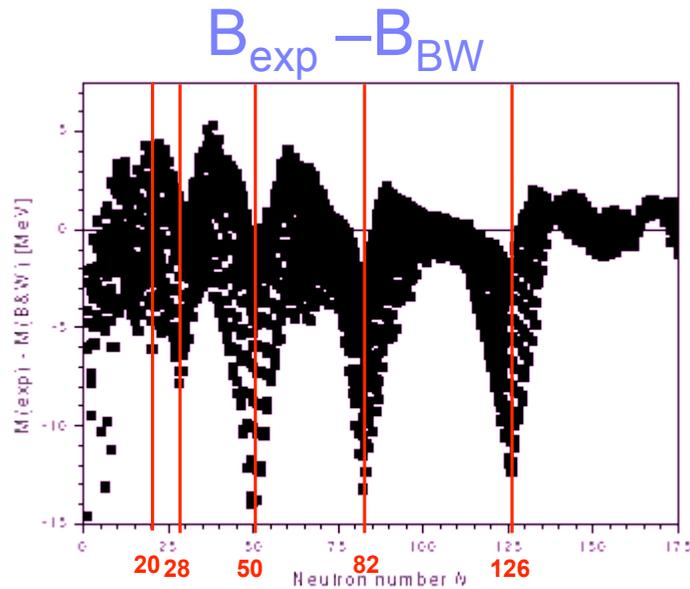
1953 Bohr: Il s'agit d'une excitation de type rotation collective (et il y a aussi des vibrations collectives) comme dans les molécules

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

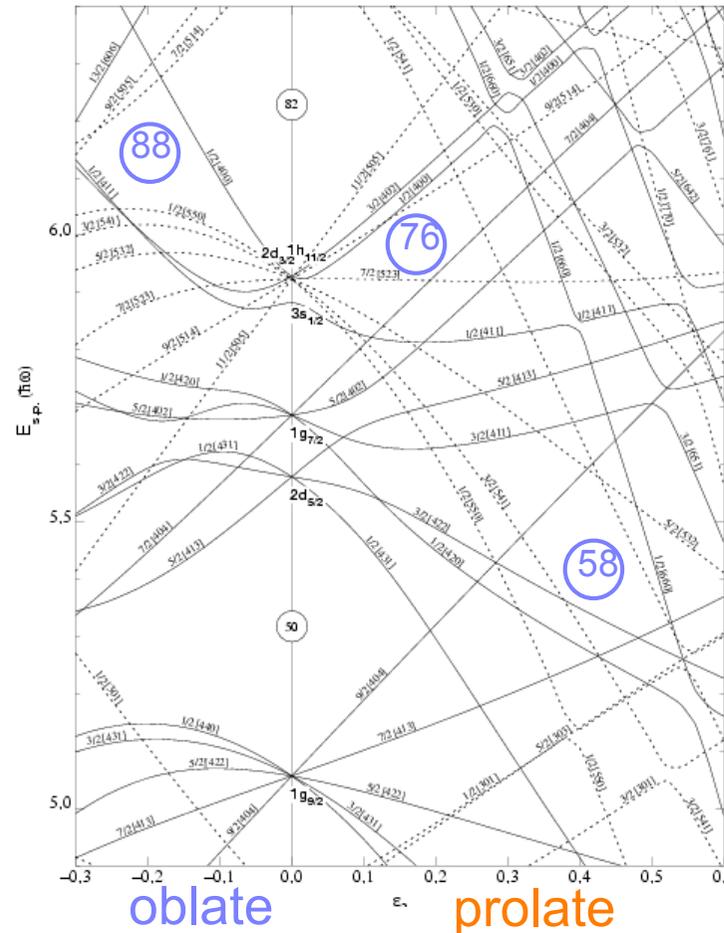
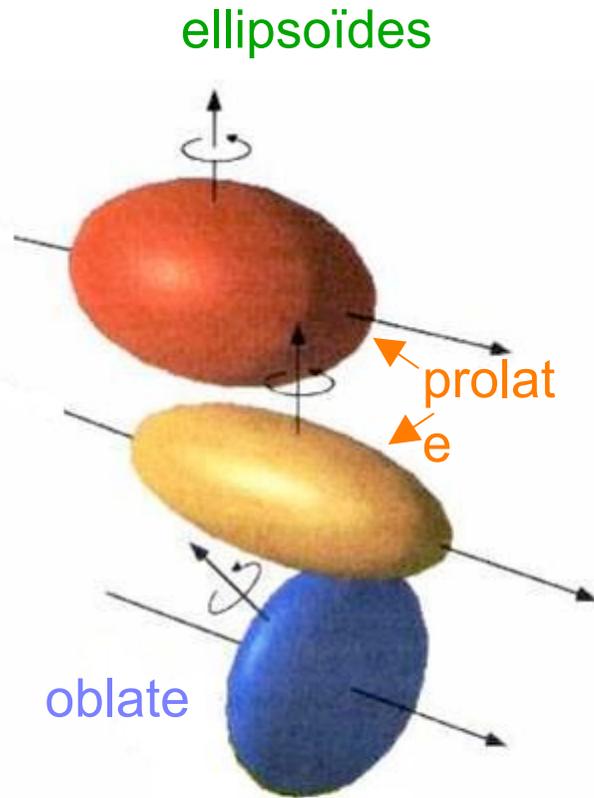


- calcul quantique puits sphérique
- “ ” puits déformé

⇒ 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)

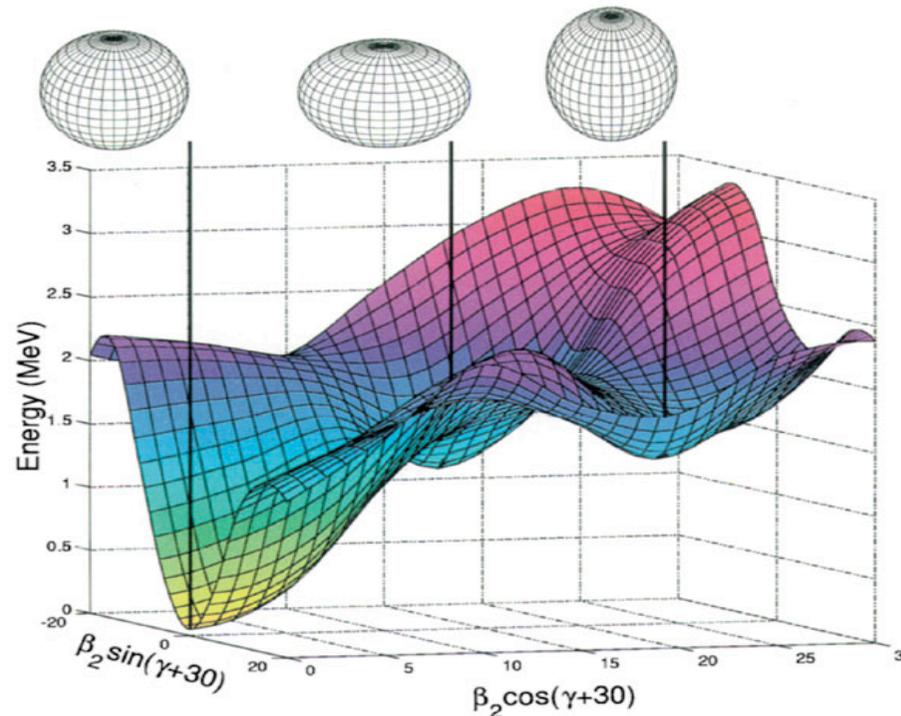
gaps : ⑩
↔ forme(s) stable(s)
dans états et/ou
excités

Osc. Harm différents sur chaque axe - $D\ell^2$ + terme spin-orbite

Coexistence de forme

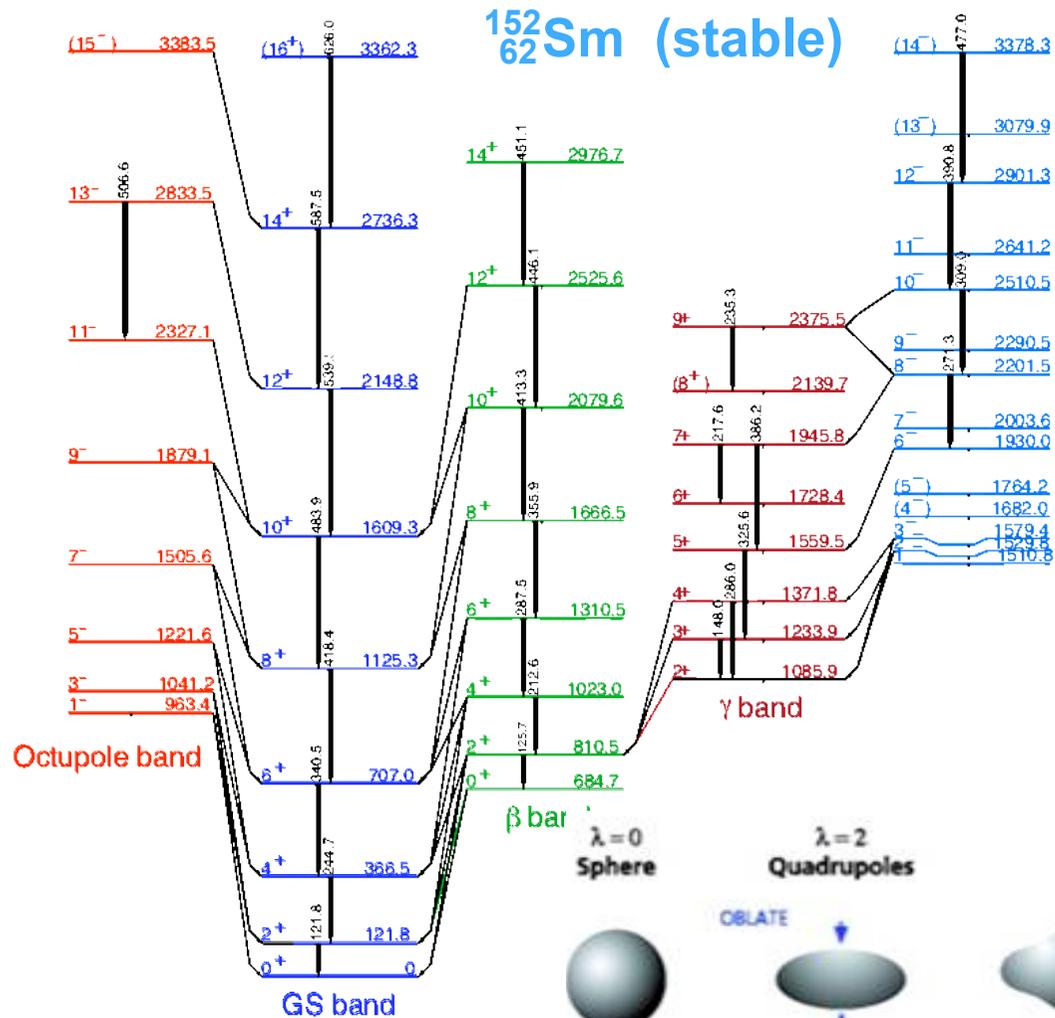
Un noyau peut avoir plusieurs états J^π chacun associé à une forme différente
Ici les 3 formes possibles de ^{186}Pb (noyau pair-pair) donneront 3 états 0^+

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

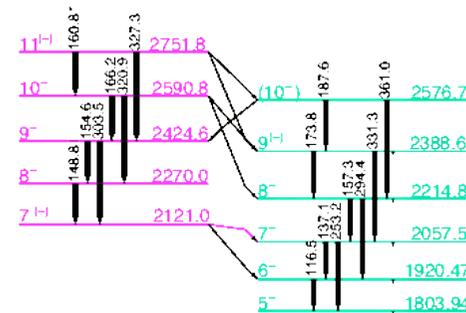


Plusieurs formes \Rightarrow plusieurs types d'excitation, plusieurs bandes....
 \Rightarrow ça se complique encore : dans les noyau impairs ou impair-impairs
l'excitation individuelle peut se coupler à chaque excitation collective du cœur
pair-pair (modèle unifié de Bohr 1953)...

transitions entre états



1 forme \Rightarrow min 1 bande !



déTECTABLE
 semi-conducteurs
 (Ge, CdTe, Si)
 scintillateurs
 (NaI, BGO, BaF₂, CSI, LaBr₃...)

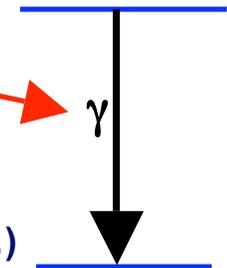
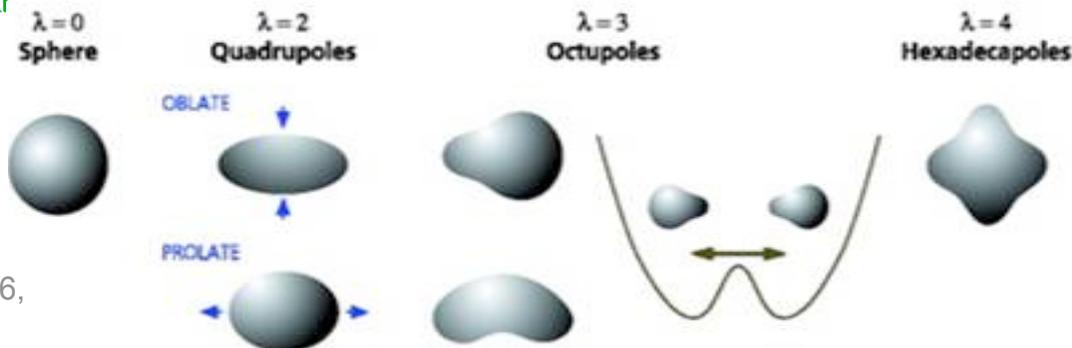


schéma de niveaux ^{152}Sm
 "Table of Isotopes", R. Firestone 1996,

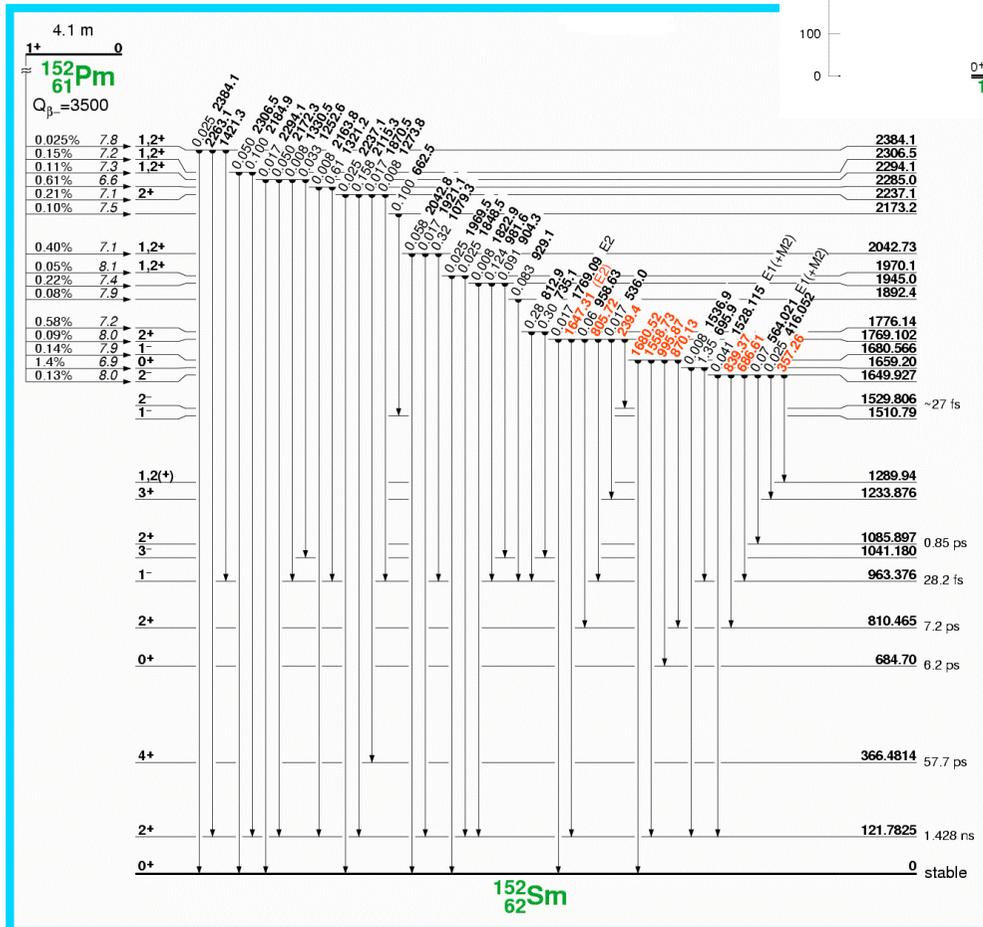


B. Gall : <http://www.edpsciences.org/articles/anphys/pdf/1999/06/annales.pdf>

\Rightarrow de multiples expériences sont nécessaires en faisceau

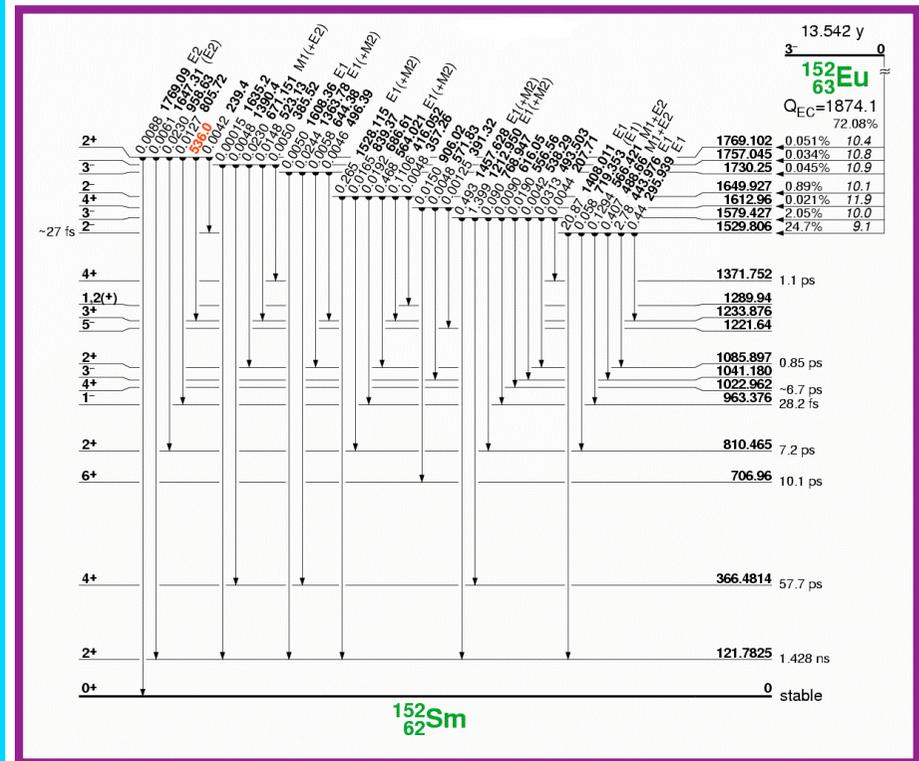
Aussi en décroissance

Partiel



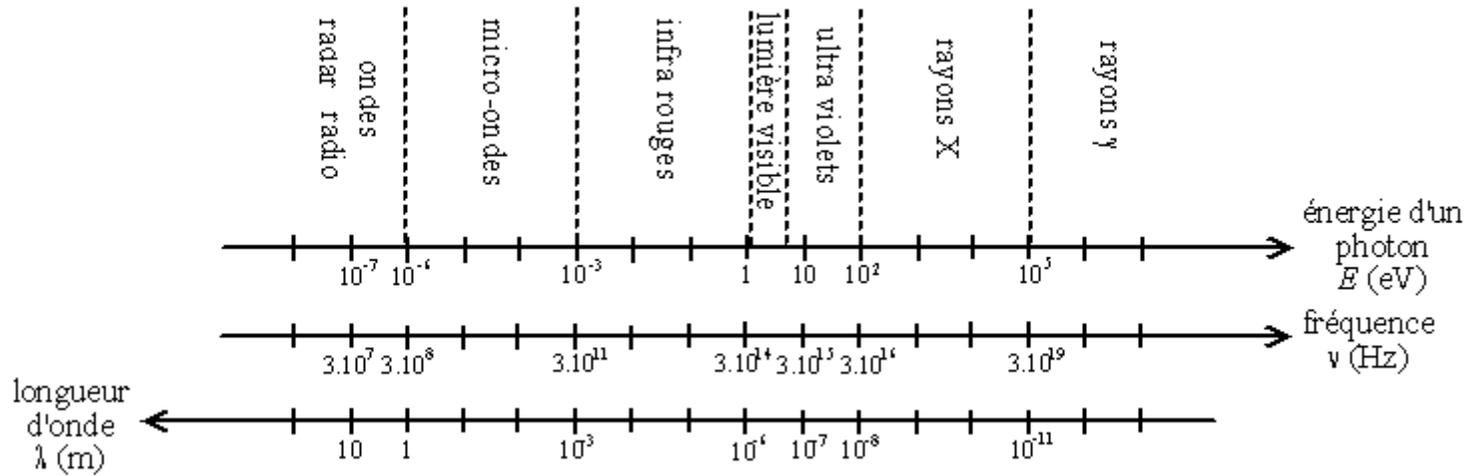
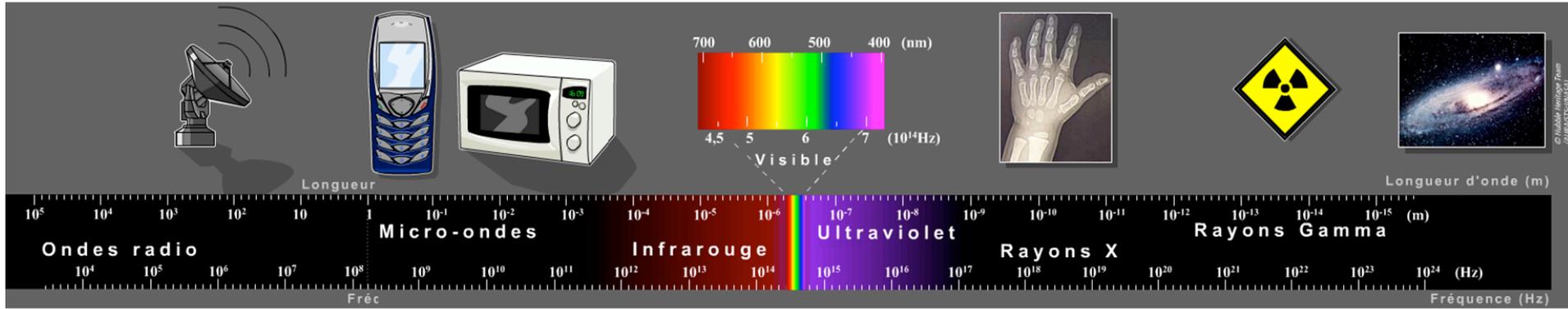
schémas de niveaux ^{152}Sm "Table of Isotopes", R. Firestone 1996

Partiel



I. Deloncle, Fréjus 2010

spectre électromagnétique



sources: spectre électromagnétique couleurs à partir de http://www.edumedia-sciences.com/a189_l1-spectre-electromagnetique.html
 échelles : http://fr.wikipedia.org/wiki/Spectre_électromagnétique

Résumé sur la description du noyau

aspect classique (macroscopique) :

goutte liquide \Rightarrow masse \Rightarrow fission, déformation et excitations collectives
expérience – goutte classique fait apparaître nombre magique

aspect quantique (microscopique) :

particules indtes, potentiel moyen \Rightarrow nombres magiques, couches, excit° individuelle

bon nombres magiques (pt sphérique) \Leftrightarrow surface du noyau, potentiel spin-orbite

noyaux magiques : peu états excités basse énergie, stabilité

noyaux déformés \Leftrightarrow gaps (possibilité test potentiel moyen déformé), excitation collective (?),
individuelle (?) couplage

\Leftrightarrow la déformation et masse d'un noyau sont des quantités essentielles à mesurer

masse \Leftrightarrow stabilité, réaction

schéma de niveaux (spectre, séquence états excités) \Leftrightarrow type excitation

désexcitation \Leftrightarrow transitions gamma

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

Succès de l'approximation du potentiel moyen

⇒ méthodes plus fondamentales :

➡ construire LE potentiel moyen DE chaque noyau à partir d'une **force « effective »** V_{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^{er} ordre (cœur) décrit par calcul précédent

2nd ordre: on calcule tous les termes nucléon_{valence}-nucléon_{valence} avec une force V_{couches} (4 types de force dont une effective car manque de données...)

⇔ tester la validité, le pouvoir prédictif des forces
loin de la stabilité...

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

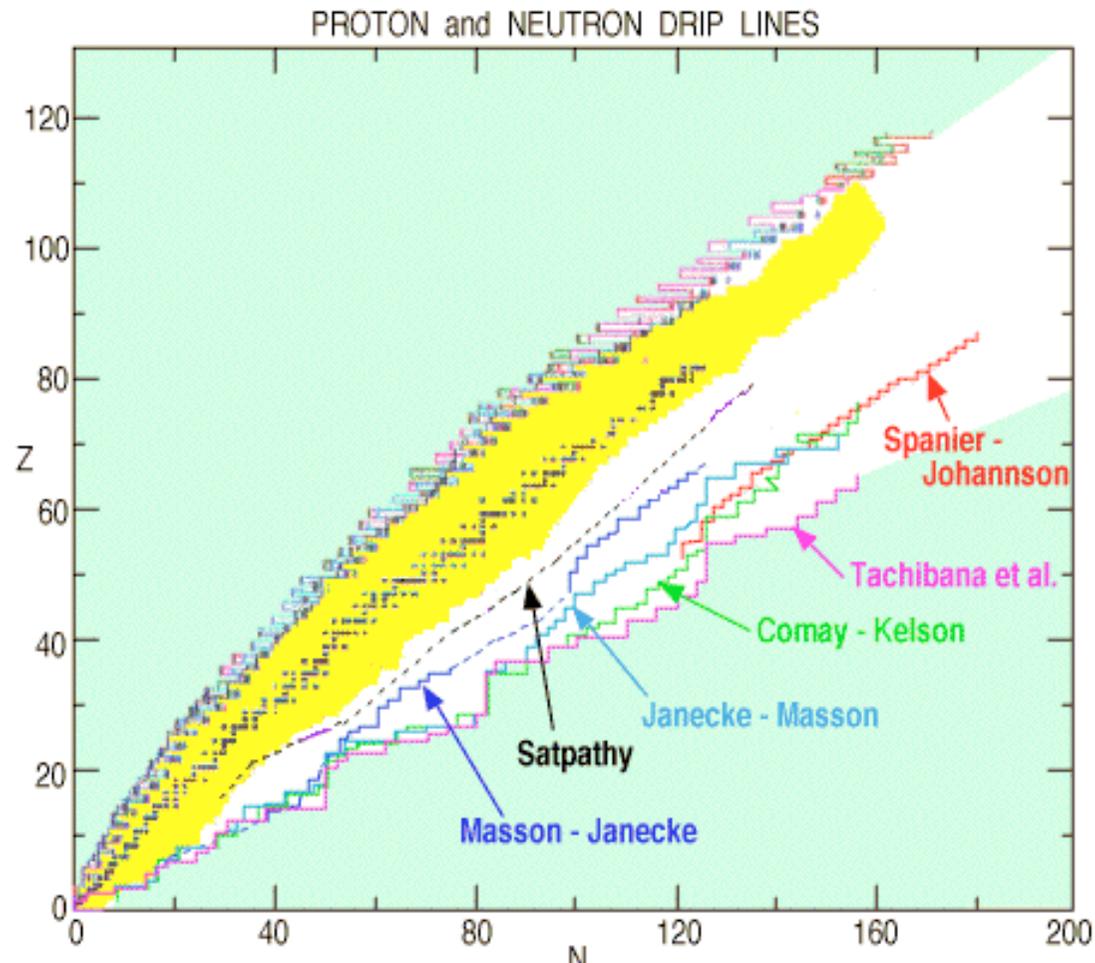
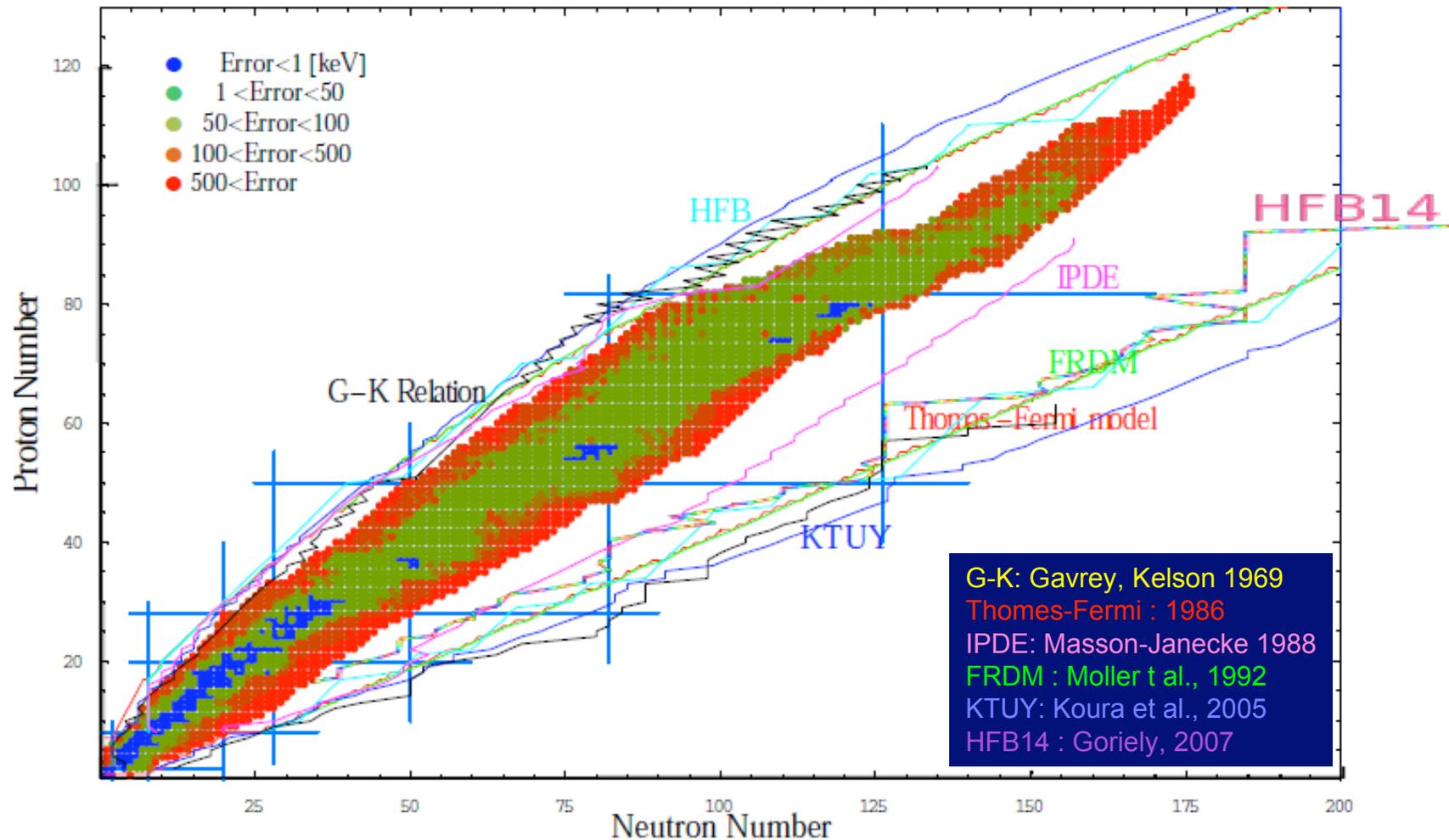


Fig. I.1: Chart of the nuclides showing the stable nuclei (dots), the region of known nuclei (yellow area), various dripline predictions [HA88] for both protons and neutrons, and the r-process path.

Le PEU (!) que nous connaissons n'est pas suffisant

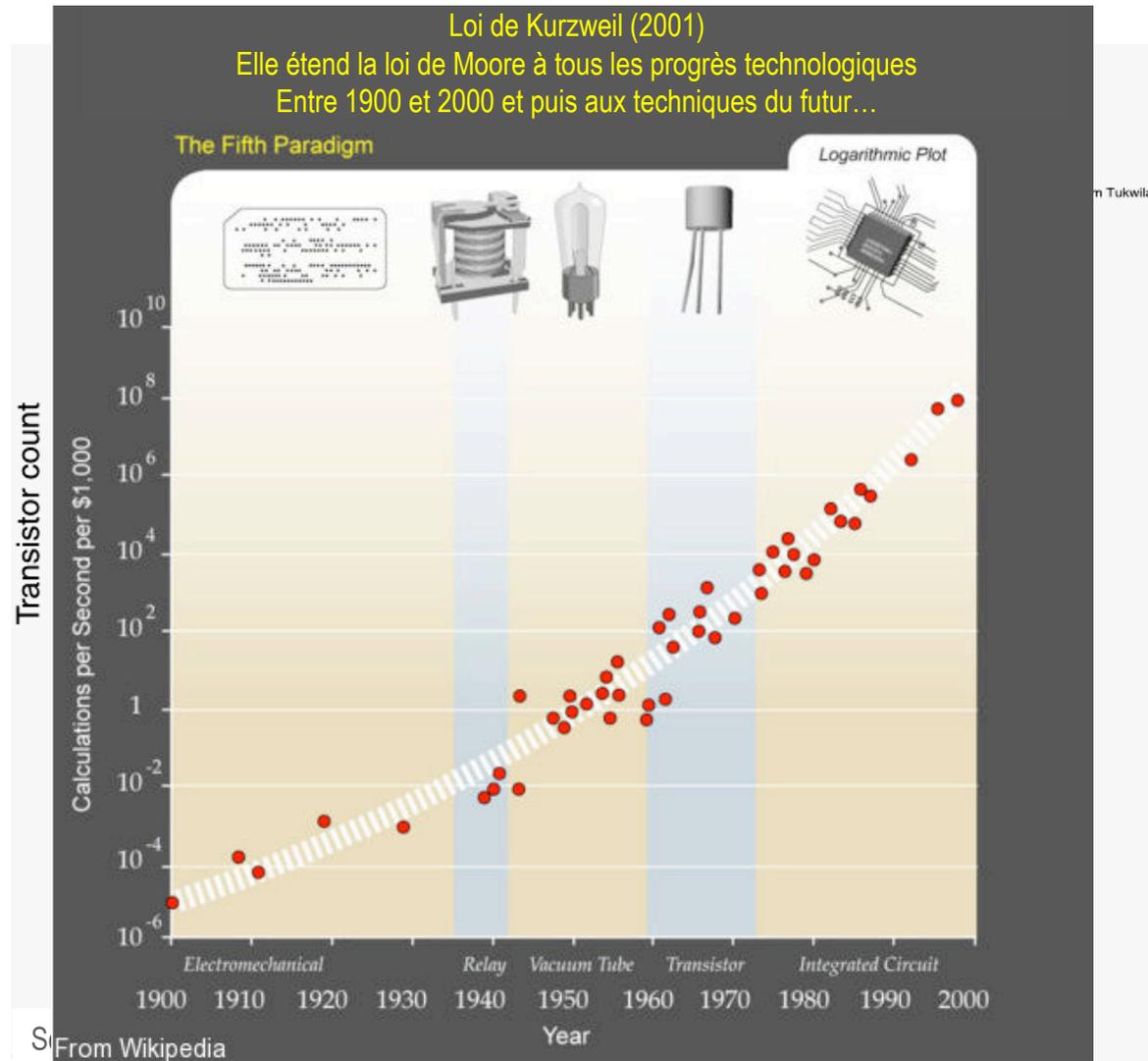


Enjeu Physique Nucléaire aujourd'hui:

créer noyaux loin ceux "utilisés" pour définir interactions d'aujourd'hui
de nouvelles paramétrisations / interactions

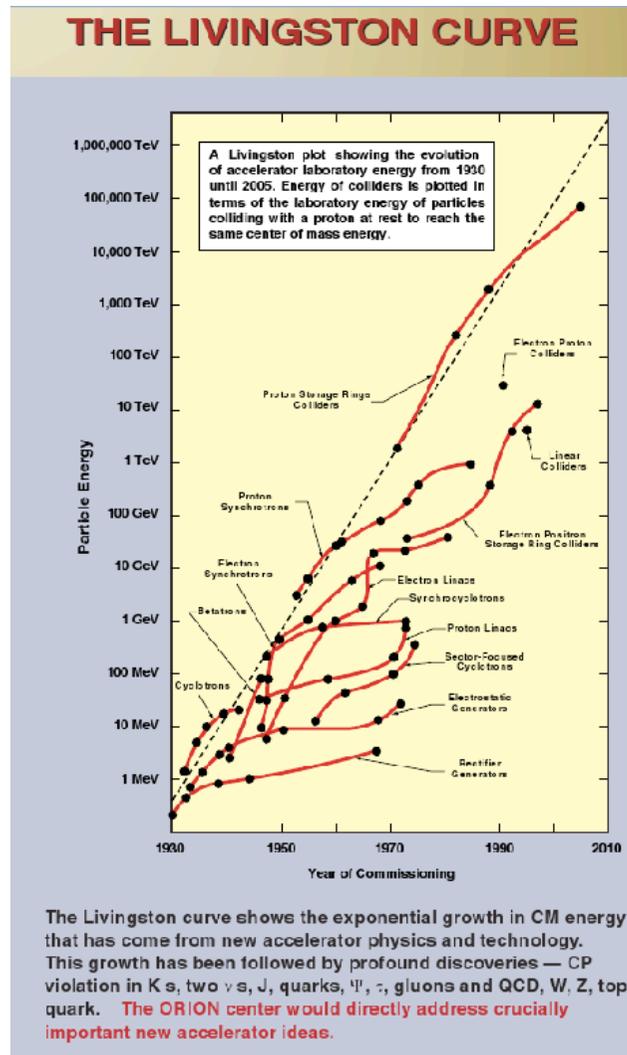
Expériences :
créer des noyaux
loin des zones
normalement peuplées

Un petit détour: Mesure du progrès technologique



Progrès technologique des accélérateurs

Accélérateurs



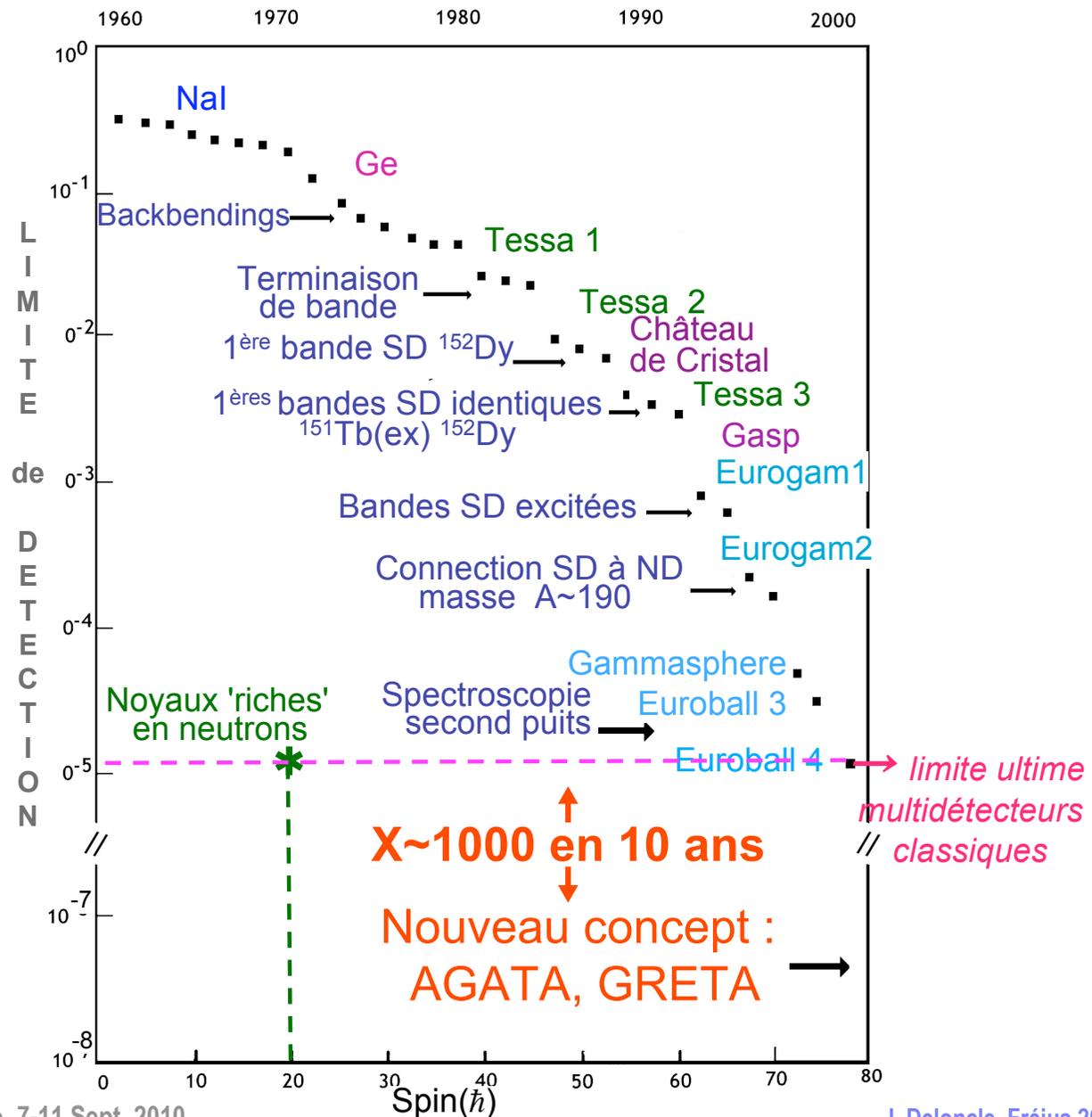
From SLAC, Lepton Photon 2001

Gain en énergie accélérateur:
 $\approx x10$ tous les 10 ans

Progrès technologiques en détecteurs

gain en sensibilité
des détecteurs γ :
 $\sim \times 10$ par 10 ans

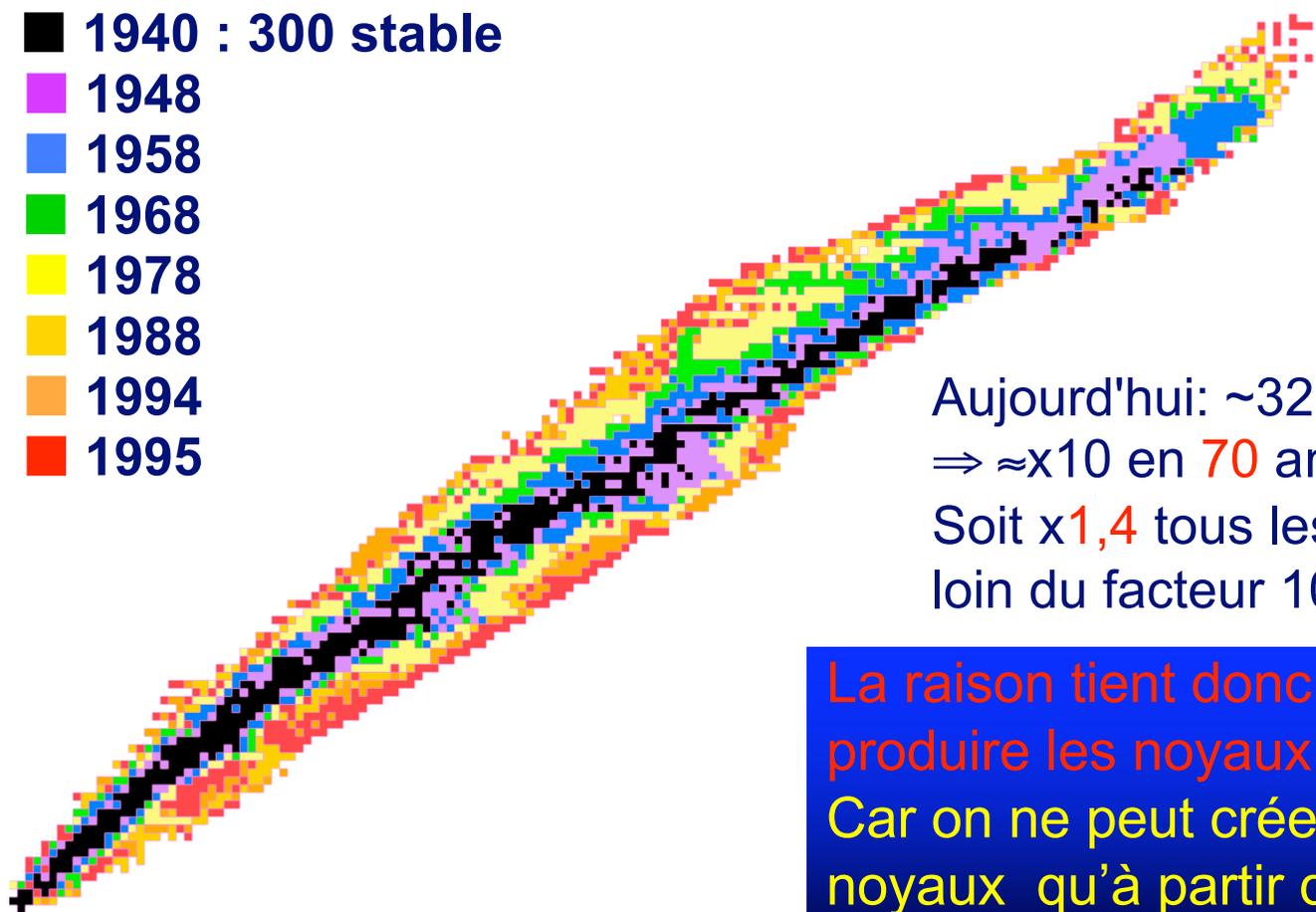
Confirmé par
découvertes



Il y a donc une difficulté

Noyaux observés:

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



Aujourd'hui: ~3200 noyaux observés
⇒ $\approx \times 10$ en 70 ans
Soit $\times 1,4$ tous les 10 ans
loin du facteur 10...

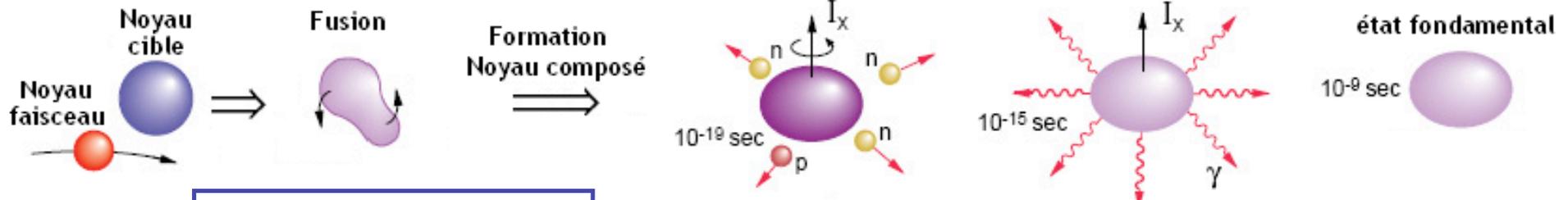
La raison tient donc aux réactions pour
produire les noyaux....
Car on ne peut créer des
noyaux qu'à partir de noyaux
déjà existants....

Réactions à partir de noyaux stables... Fusion - évaporation

Réactions Ions lourds :

léger : $N = Z$

+ lourd : $N \gg Z$

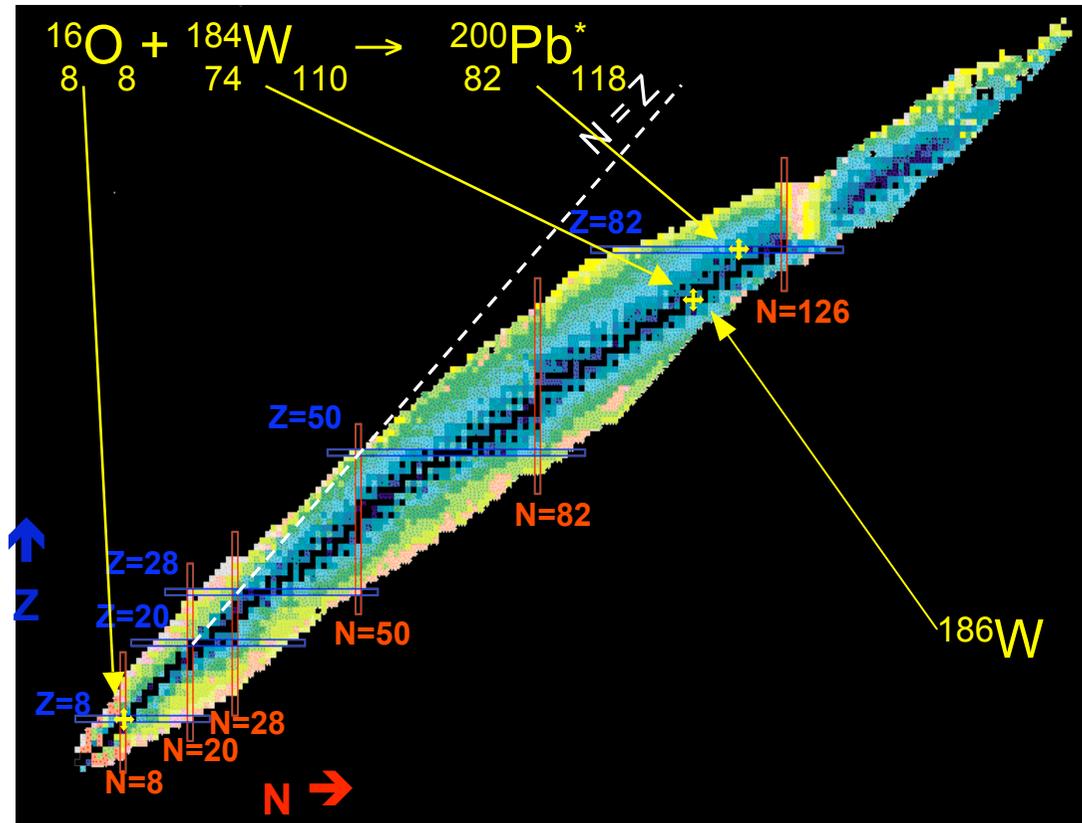


<p>noyau lourd + Σ nucléons $\Rightarrow N > Z$ \Rightarrow côté déficients neutrons</p>	<p>Rotation \Rightarrow chemin des très grandes déformations: super, hyper- déformation MAIS Evaporation de particules légères (p,n..) \Rightarrow déficients neutrons</p>	<p>moyen détection: ⊕ noyau de recul ⊕ particules légères ⊕ γ</p>
---	--	---

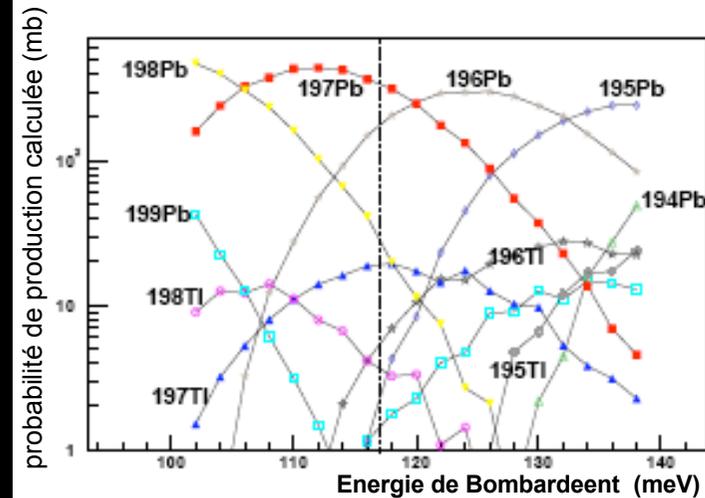


${}^{200}\text{Pb} \Rightarrow$ côté déficients neutrons: ${}^{206}\text{Pb}$ dernier isotope stable (donc abondant)
période du ${}^{204}\text{Pb}$ (1,4% du Pb sur Terre) $\sim 10^{17}$ ans (âge Terre $4,6 \cdot 10^9$ ans)

Fusion-évaporation de noyaux stables...



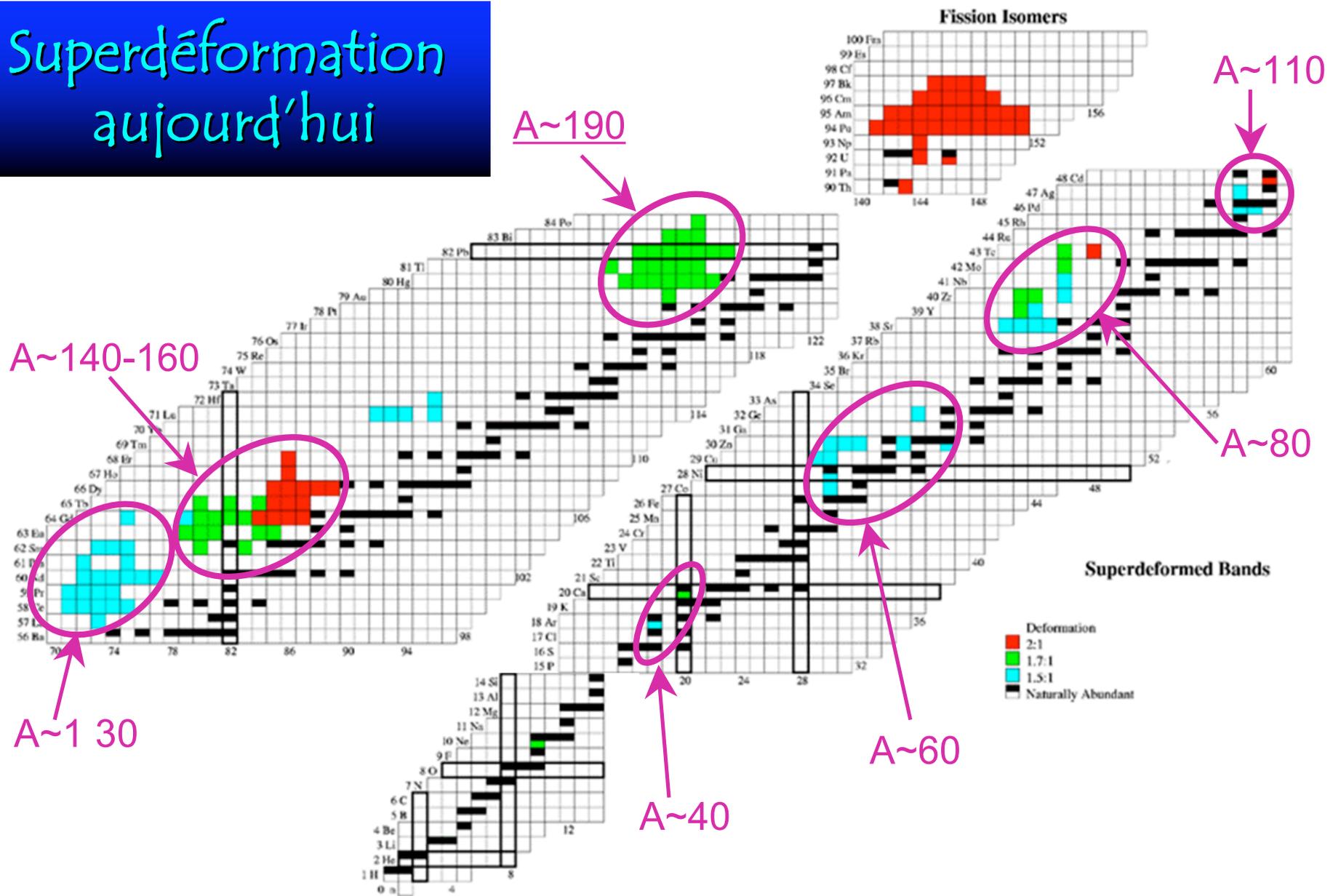
on peut parfois jouer sur
autres isotopes stables ici ^{186}W



$E_{\text{beam}} \sim 120 \text{ MeV}$ 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

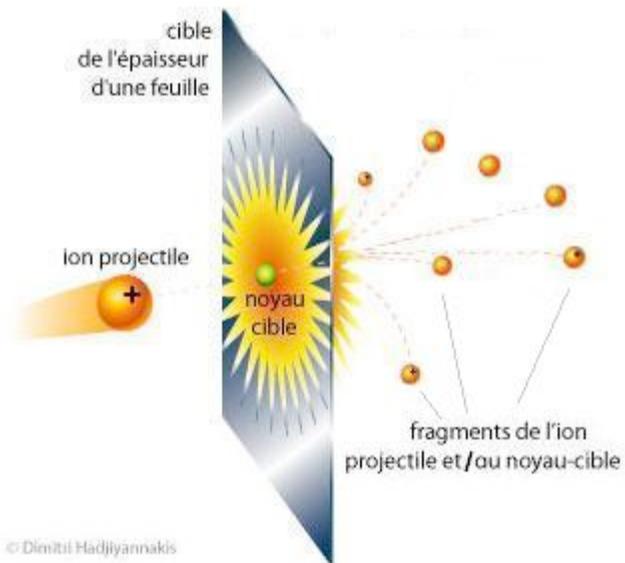
Superd  deformation aujourd'hui



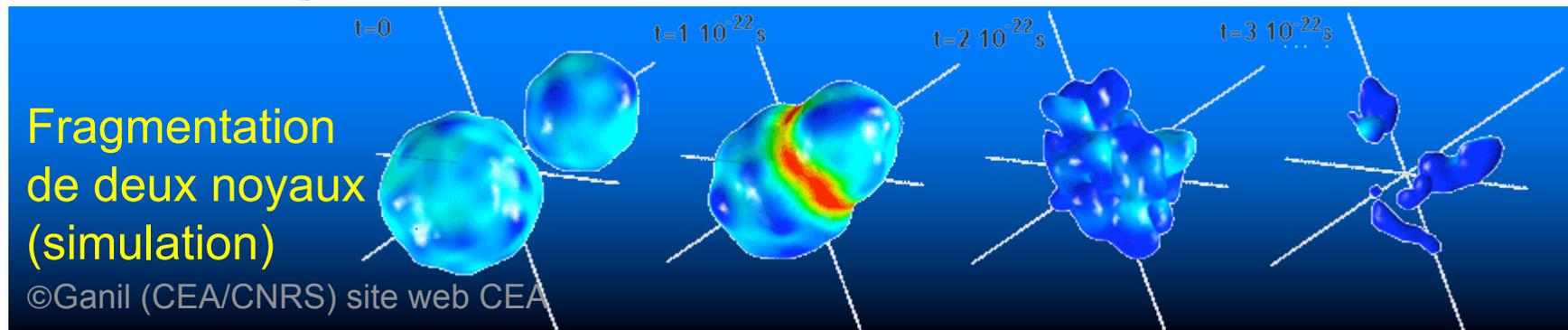
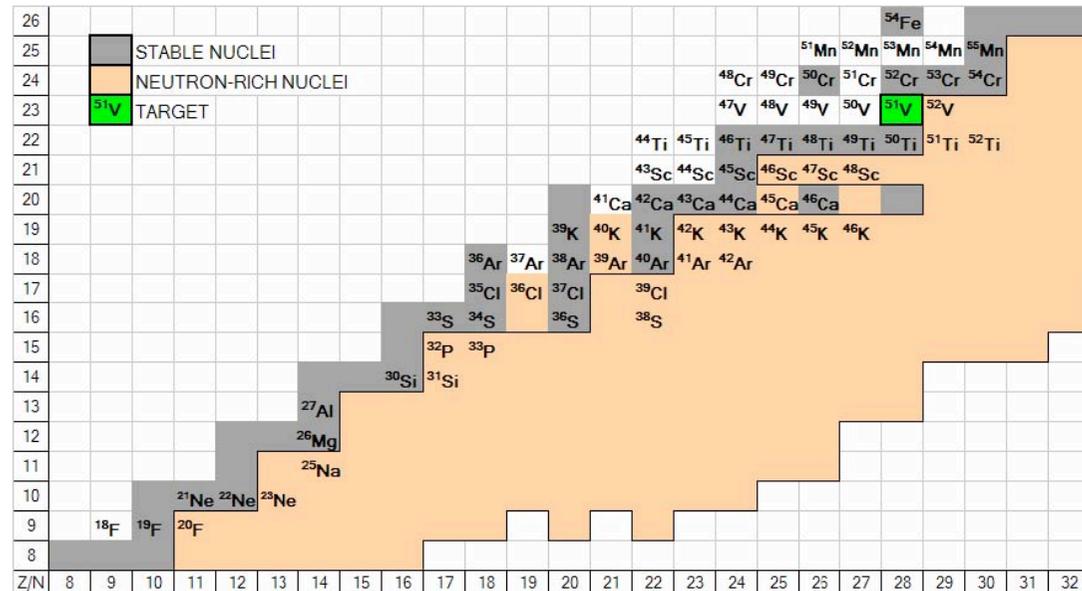
Pourtant, il y a toutes les raisons de penser qu'il y en a autant de l'autre côte de la vallée ...

Fragmentation

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

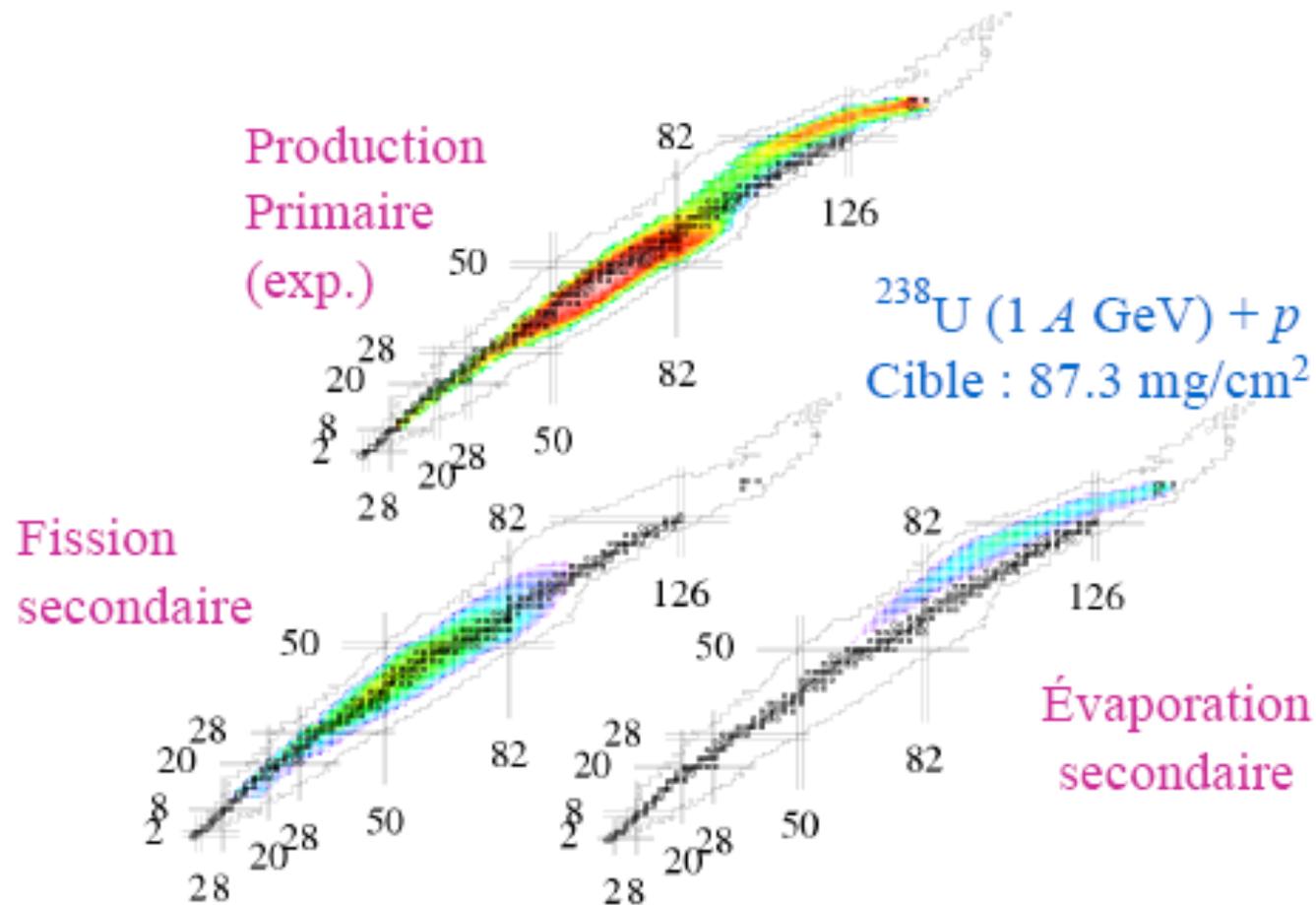


Fragments de la cible de ^{51}V sous faisceau de ^{12}C (30MeV/A)



Spallation

p (n) encore plus d'énergie (pas d'énergie de liaison): de qqs 100 MeV au GeV
⇒ **billard interne** (cascade intranucléaire) bcp de nucléons sont éjectés
⇒ il reste un noyau encore très excité qui peut fissionner si fissile



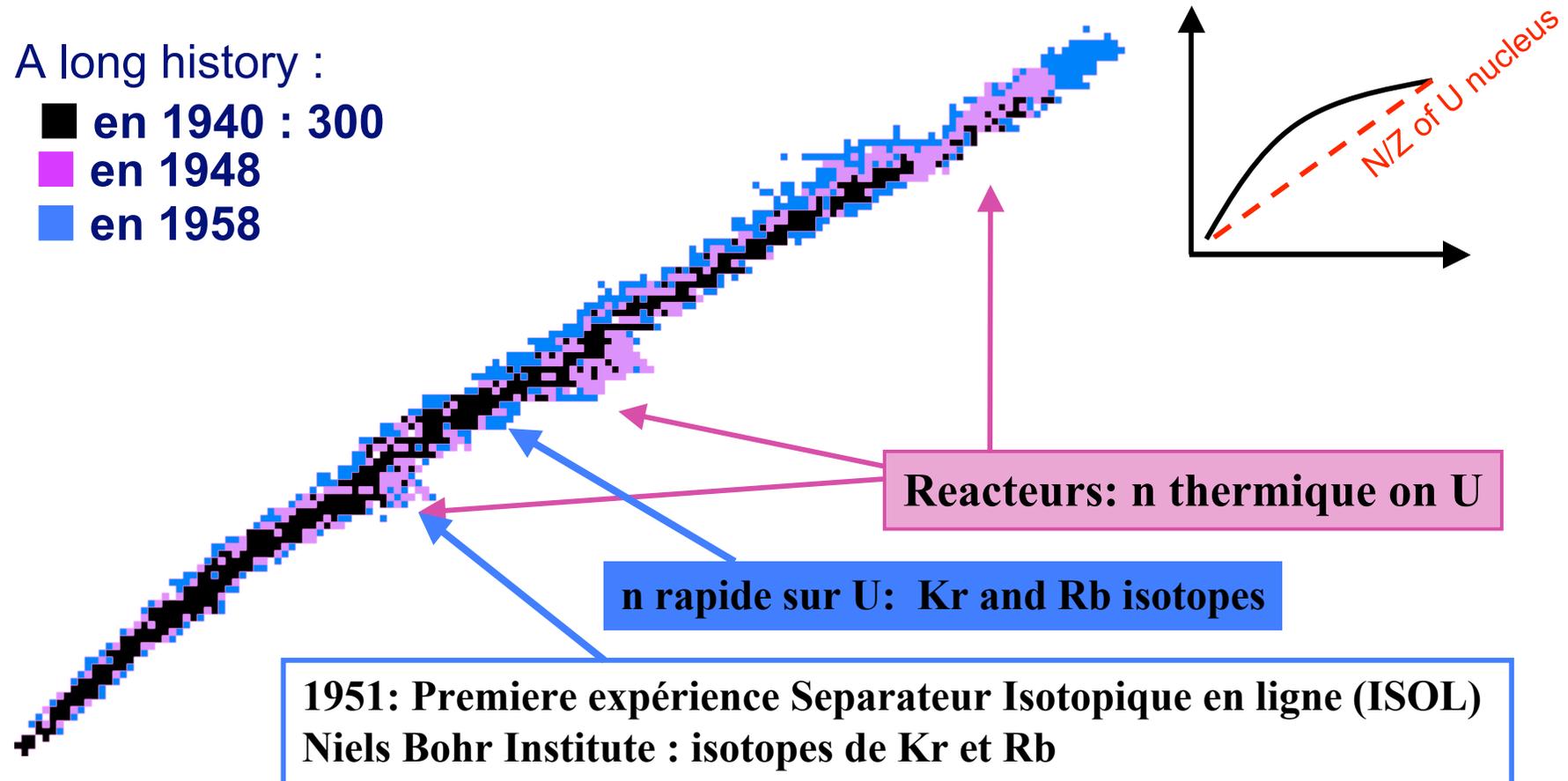
Fission induite par neutron

(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")

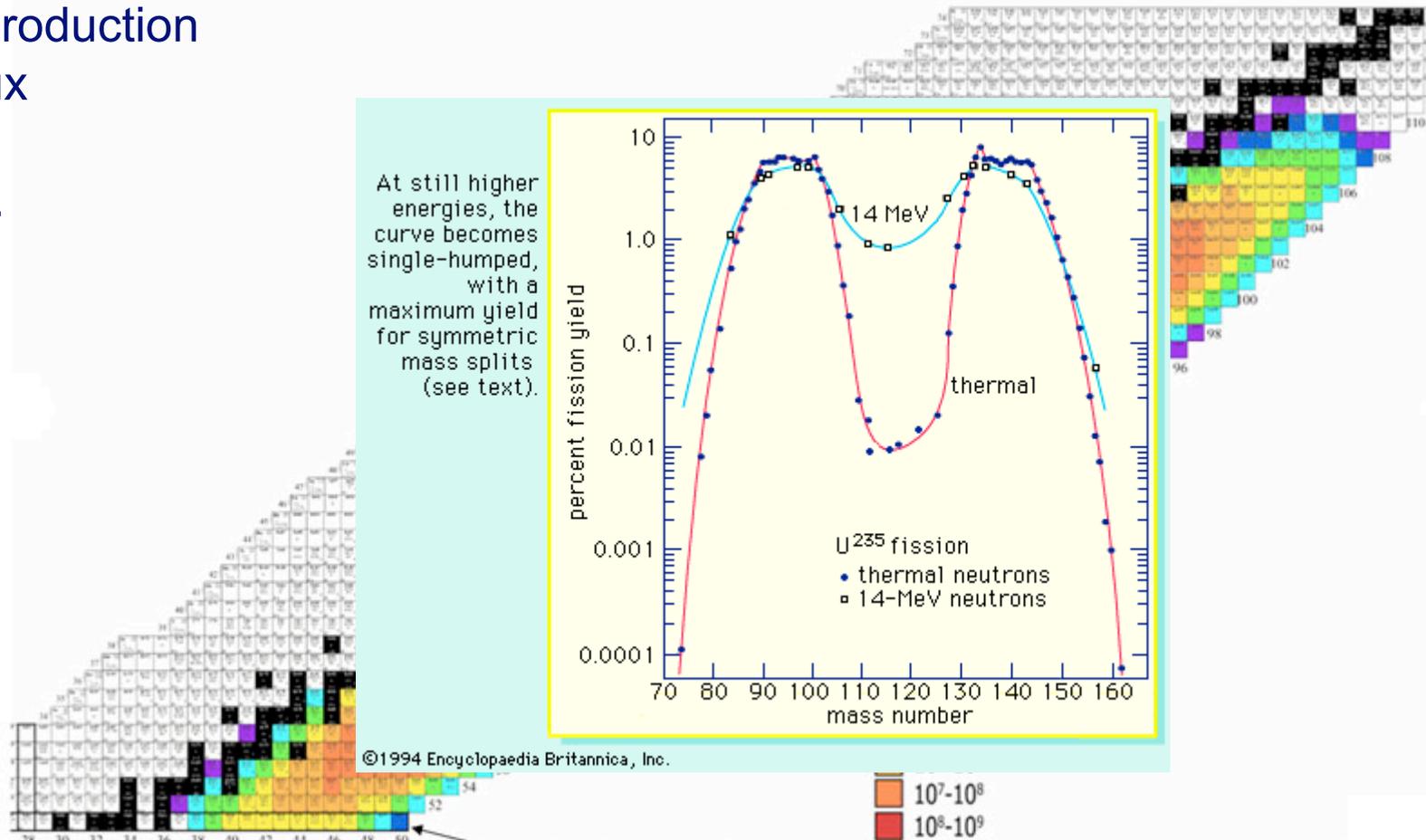
A long history :

- en 1940 : 300
- en 1948
- en 1958



Fission induite par neutrons

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

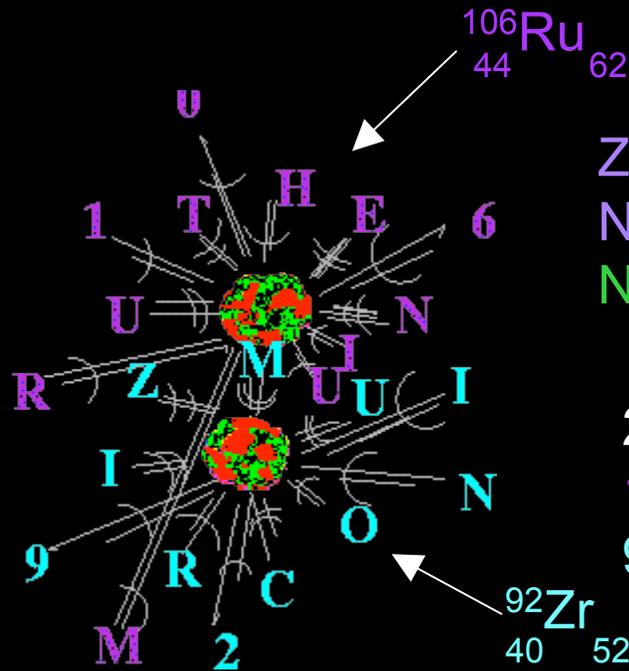
fissile essayant de trouver un équilibre qui n'existe pas

fission \Rightarrow deux noyaux évacuant leur énergie avec des neutrons

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

Chaque cascade de γ émise par chaque fragment crée à haut moment angulaire est unique

Nécessité d'une détection adaptée aux cascades



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

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

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

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 γ 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 d'ordre de coïncidence 3 et plus:

1 évt de fold 3 :

E_{γ_1}	E_{γ_2}	E_{γ_3}
----------------	----------------	----------------

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

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

-Q: Avec quelles autres énergies E_{γ_1} a-t-elle été vue ?

-R : le plus souvent avec E_{γ_2}

-Q: Avec quelles autres énergies E_{γ_1} et E_{γ_2} ensemble ont-elles été vues ?

-R : le plus souvent avec E_{γ_6}

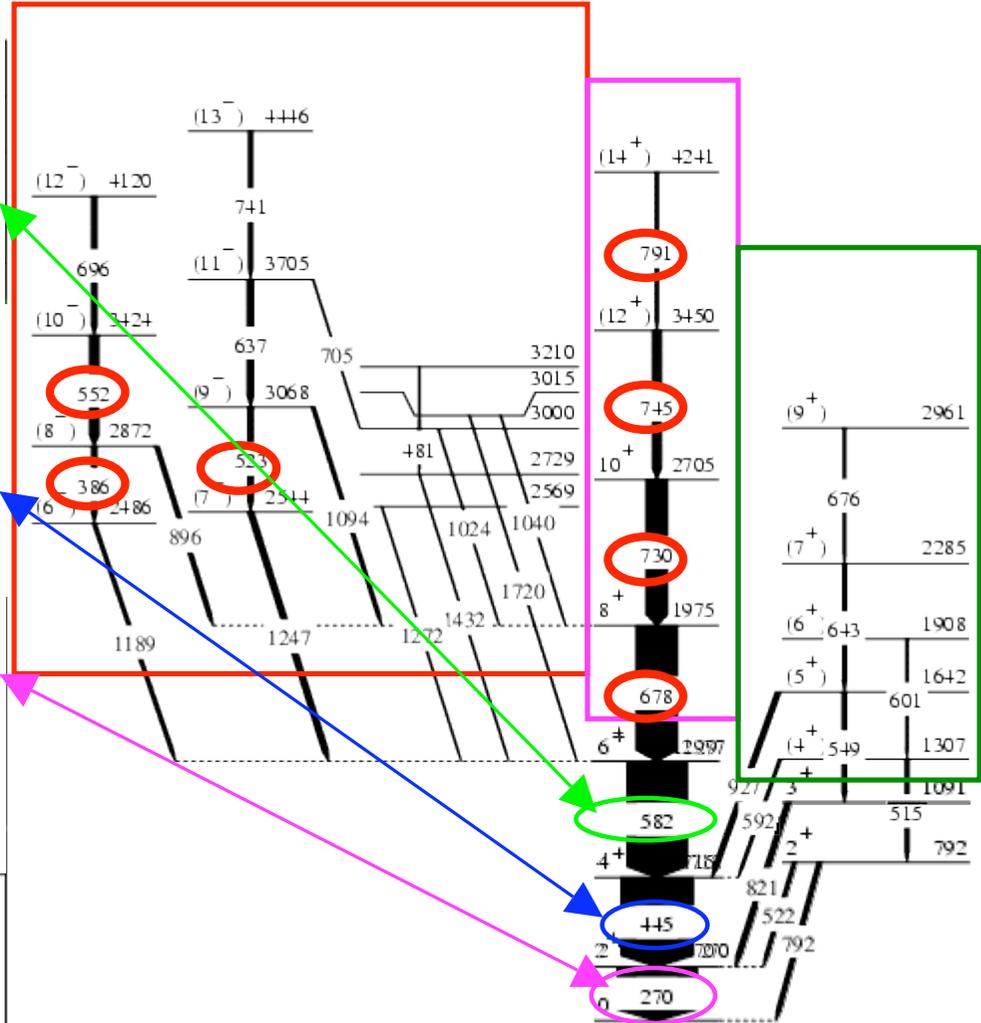
-Q: Avec quelles autres énergies E_{γ_1} et E_{γ_6} ensemble ont-elles été vues ?

-R : le plus souvent avec E_{γ_2} et E_{γ_9}

etc...

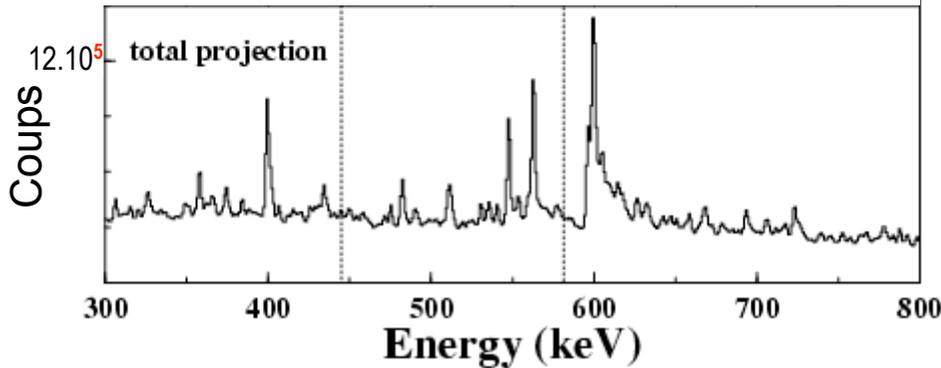
jusqu'à ce que toutes les transitions suffisamment intenses aient toutes été placées

Résultat d'un questionnaire



^{106}Ru $\sigma \sim 2\text{mb}$

départ: 5 niveaux connus

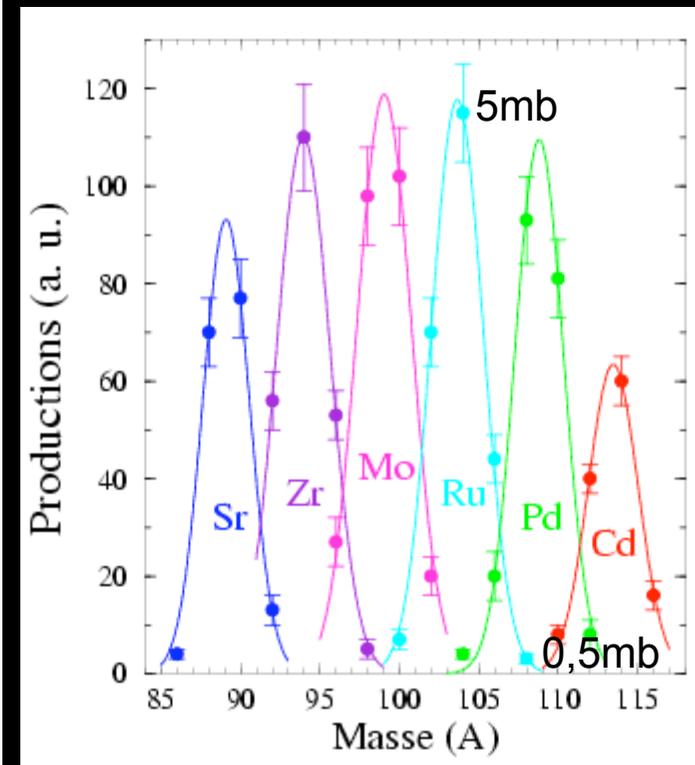
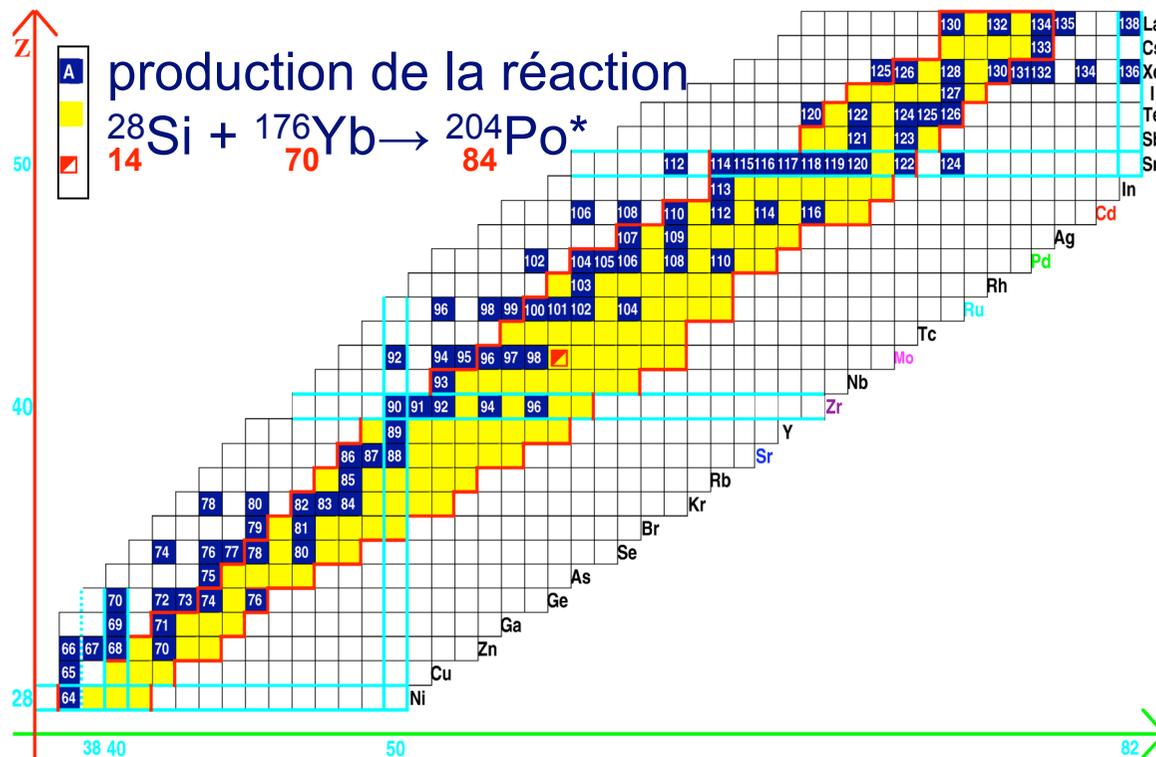


Fission induite par ions lourds:

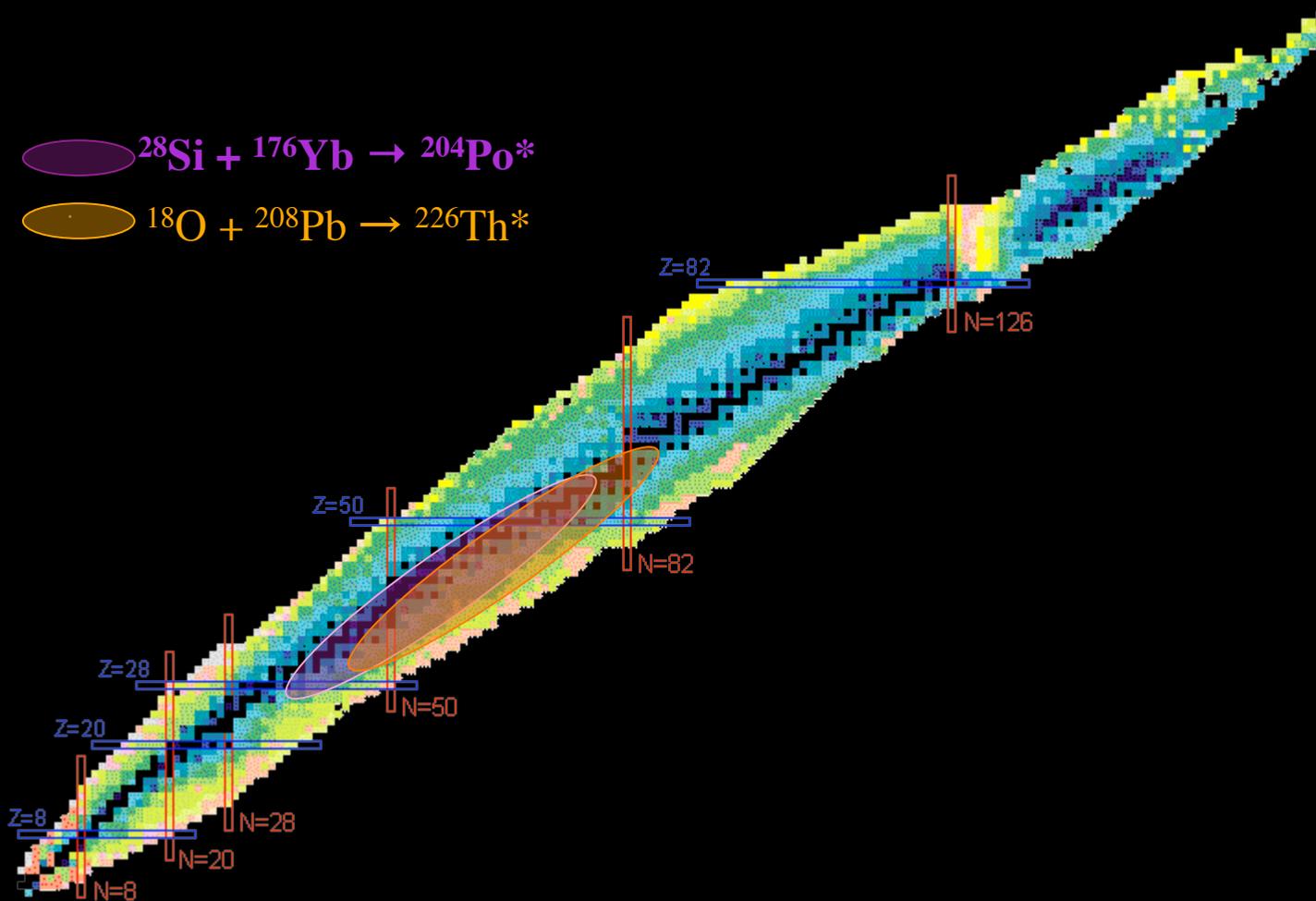
1 transition mène à tous, deux transitions à un noyau, 3 au 1^{er} embranchement

- 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 zone fission: enfin toute relative...



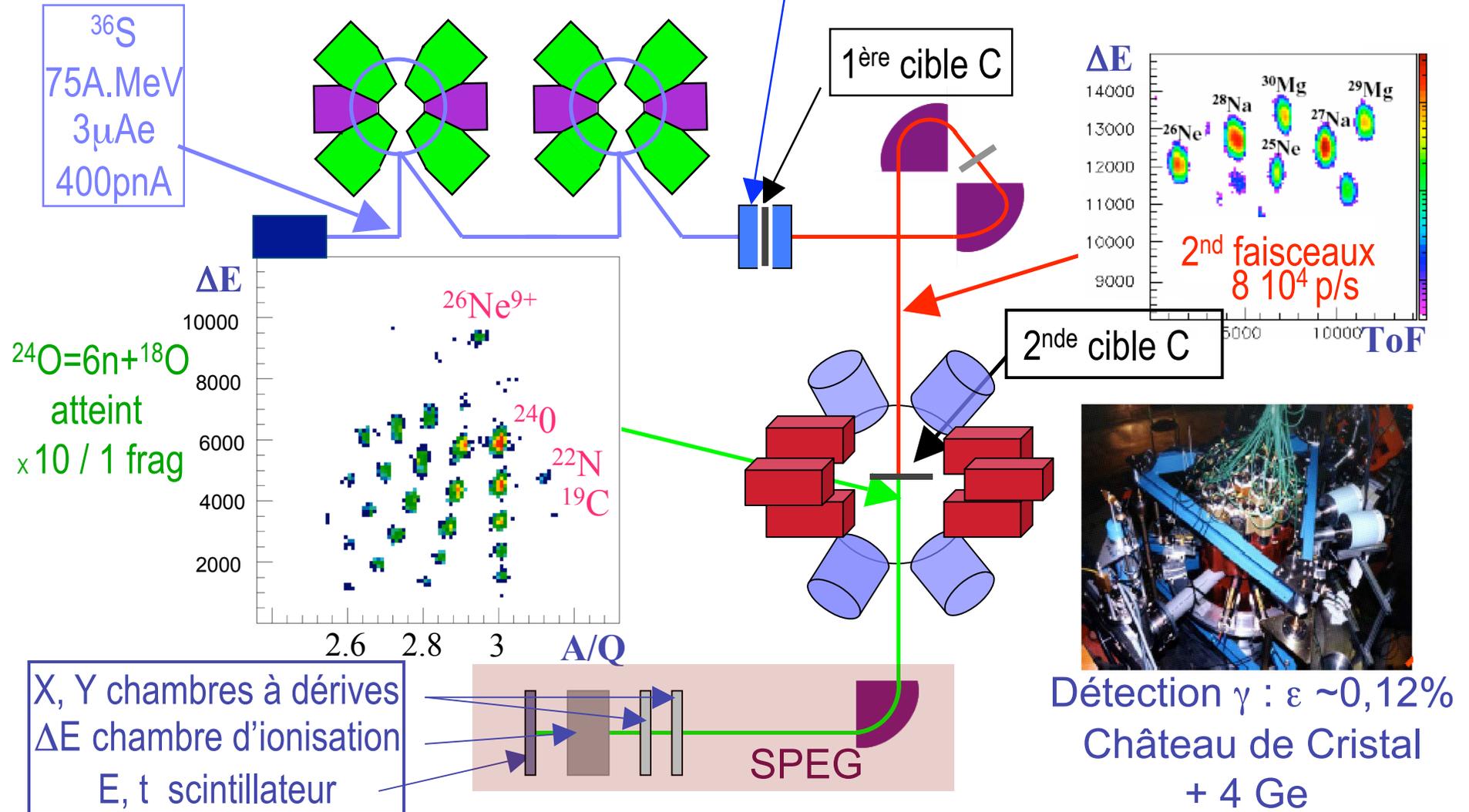
Pour aller plus loin:
faire des réactions avec les
noyaux produits

Exemple avec double fragmentation

Deux étapes de fragmentation

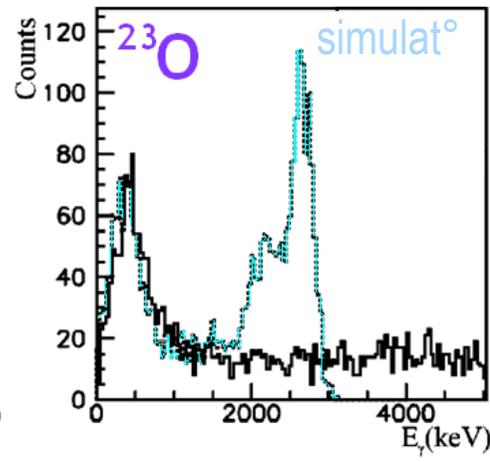
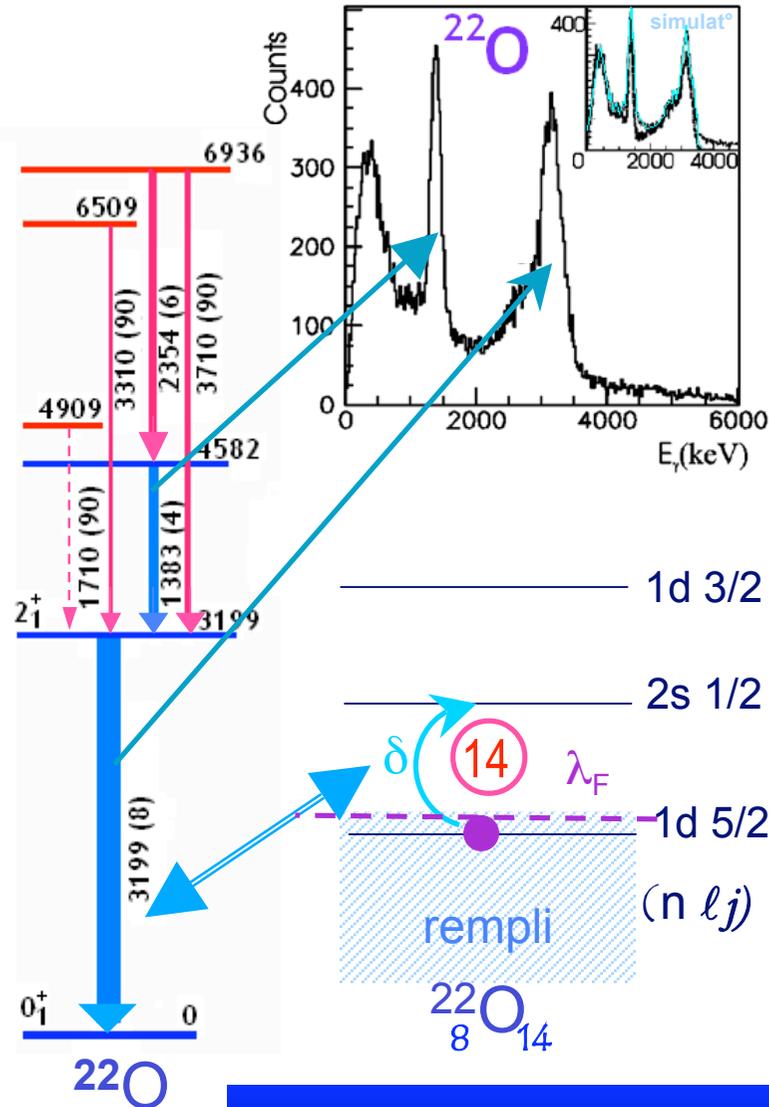
M. Stanoiu et al., Phys.Rev. C69, 034312 (2004)

SISSI : source d'ions secondaires à supraconducteurs intenses

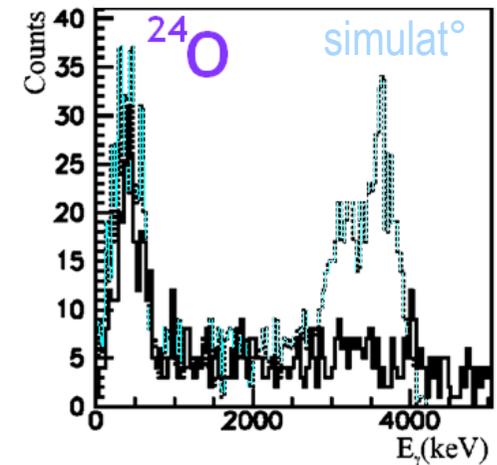
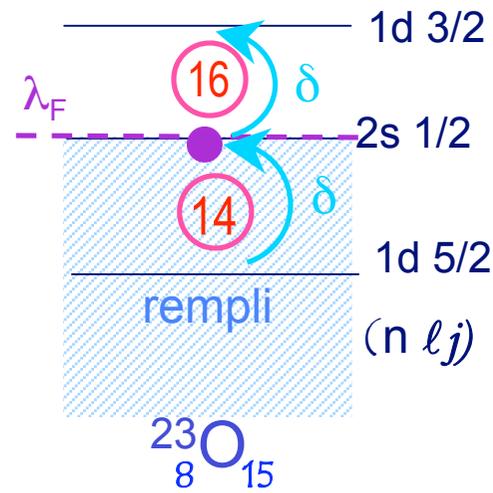


Résultats en γ pour $^{23,24}_{8}\text{O}_{15,16}$ ($^{18}\text{O}+6n$)

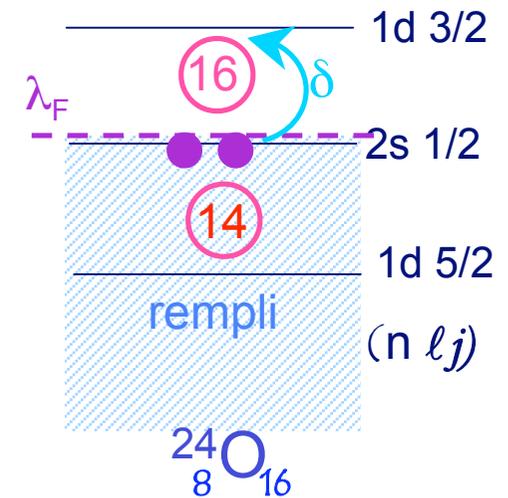
M. Stanoiu et al., Phys.Rev. C69, 034312 (2004)



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



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



Des nombres magiques disparaissent, d'autres apparaissent ...

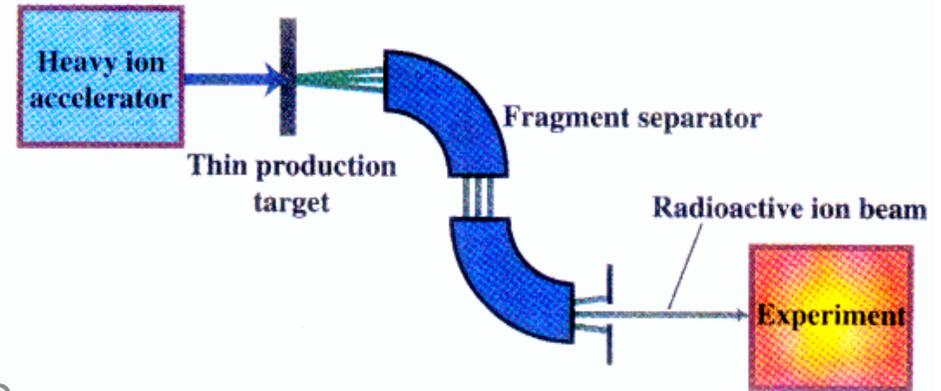
Faisceaux de noyaux produits
Installations et détecteurs
"IN2p3"

Faisceaux exotiques: deux techniques

Séparateur après fragmentation

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

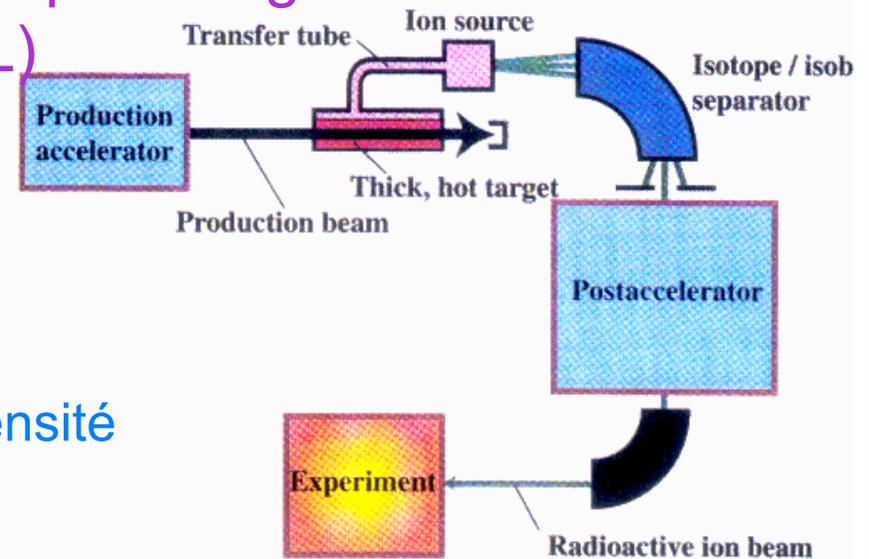
- + large variété d'éléments
- mauvaise qualité de faisceau,
- manque de flexibilité dans l'énergie



Séparation isotopique en ligne (ISOL)

REX/ISOLDE (frag., spall., fiss.)
GANIL/SPIRAL1 (frag. proj.)
(ISAAC/TRIUMF)

- + bonne qualité faisceau, flexibilité, intensité
- chimie basse énergie source (difficile)

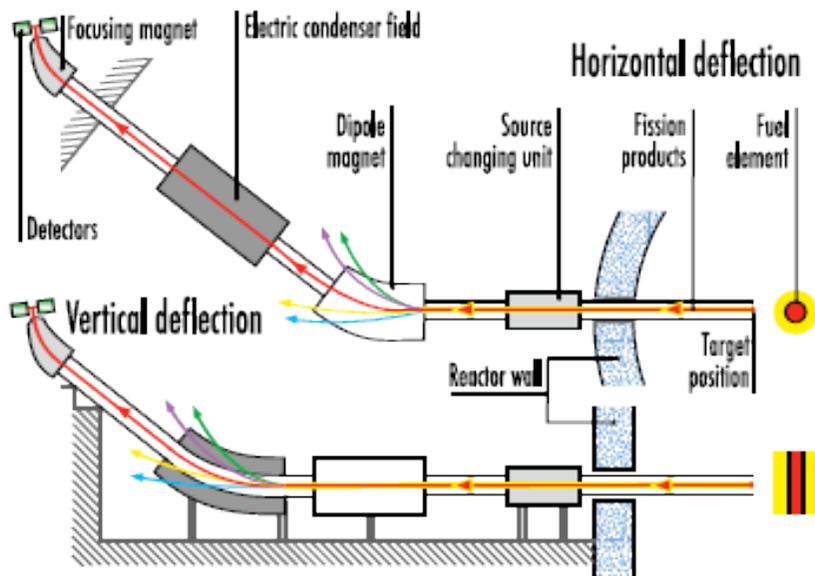
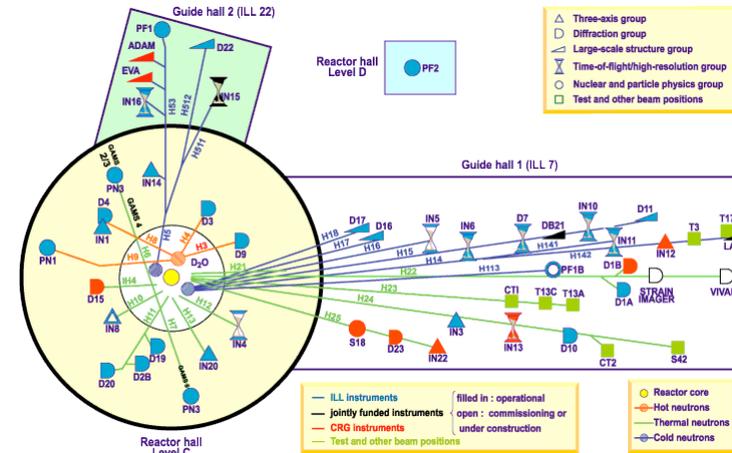


Technique 1 auprès d'un réacteur

Séparation fragments Fission induite par n réacteur

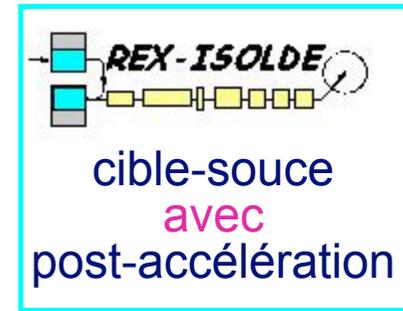
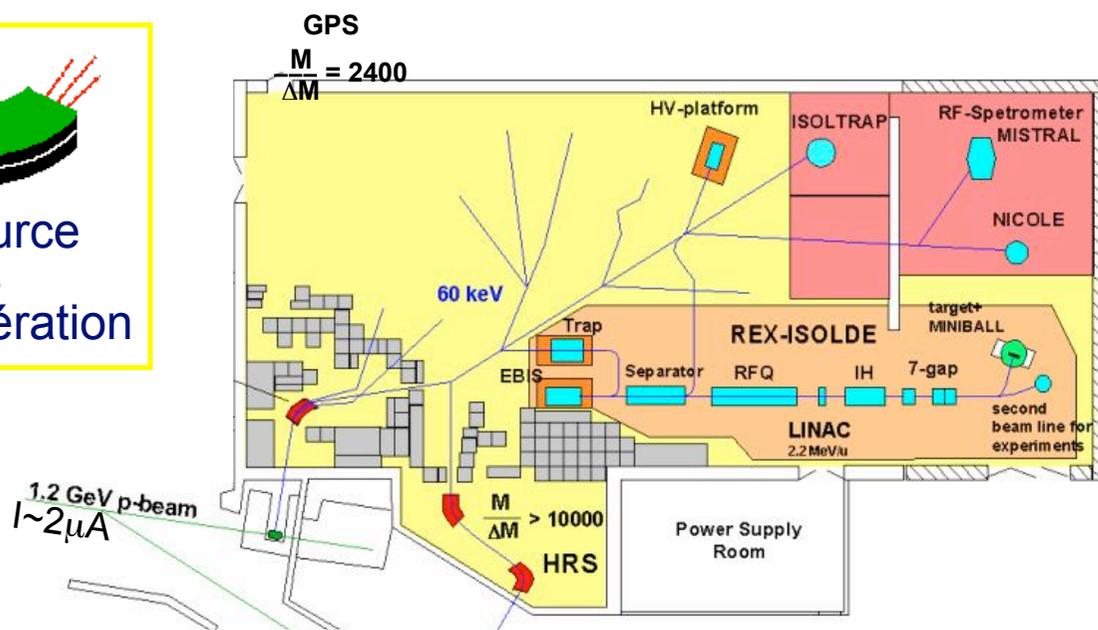
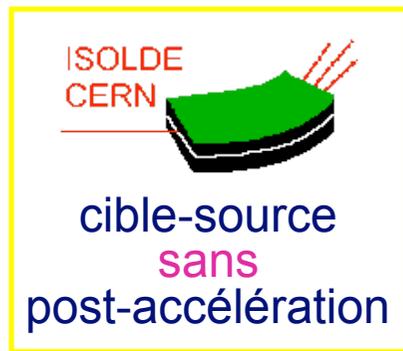
ILL/Lohengrin
(MAF)

Caractéristiques ~id fragmentation



Technique 2 au CERN

Spallation, fission



60 élts (10 isotopes)

		Ion source:																																		
		+ Surface		-		hot Plasma		cool		Laser																										
1	H																	2	He																	
3	Li	4	Be																	5	B	6	C	7	N	8	O	9	F	10	Ne					
11	Na	12	Mg																	13	Al	14	Si	15	P	16	S	17	Cl	18	Ar					
19	K	20	Ca	21	Sc	22	Ti	23	V	24	Cr	25	Mn	26	Fe	27	Co	28	Ni	29	Cu	30	Zn	31	Ga	32	Ge	33	As	34	Se	35	Br	36	Kr	
37	Rb	38	Sr	39	Y	40	Zr	41	Nb	42	Mo	43	Tc	44	Ru	45	Rh	46	Pd	47	Ag	48	Cd	49	In	50	Sn	51	Sb	52	Te	53	I	54	Xe	
55	Cs	56	Ba	*	71	Lu	72	Hf	73	Ta	74	W	75	Re	76	Os	77	Ir	78	Pt	79	Au	80	Hg	81	Tl	82	Pb	83	Bi	84	Po	85	At	86	Rn
87	Fr	88	Ra	**	103	Lr	104	Rf	105	Db	106	Sg	107	Bh	108	Hs	109	Mt	110	Ds	111	Rg														
hanides	*	57	La	58	Ce	59	Pr	60	Nd	61	Pm	62	Sm	63	Eu	64	Gd	65	Tb	66	Dy	67	Ho	68	Er	69	Tm	70	Yb							
tinides	**	89	Ac	90	Th	91	Pa	92	U	93	Np	94	Pu	95	Am	96	Cm	97	Bk	98	Cf	99	Es	100	Fm	101	Md	102	No							

Technique 2 au Ganil: Spiral

Fragmentation faisceau primaire
Post accélération dans CIME

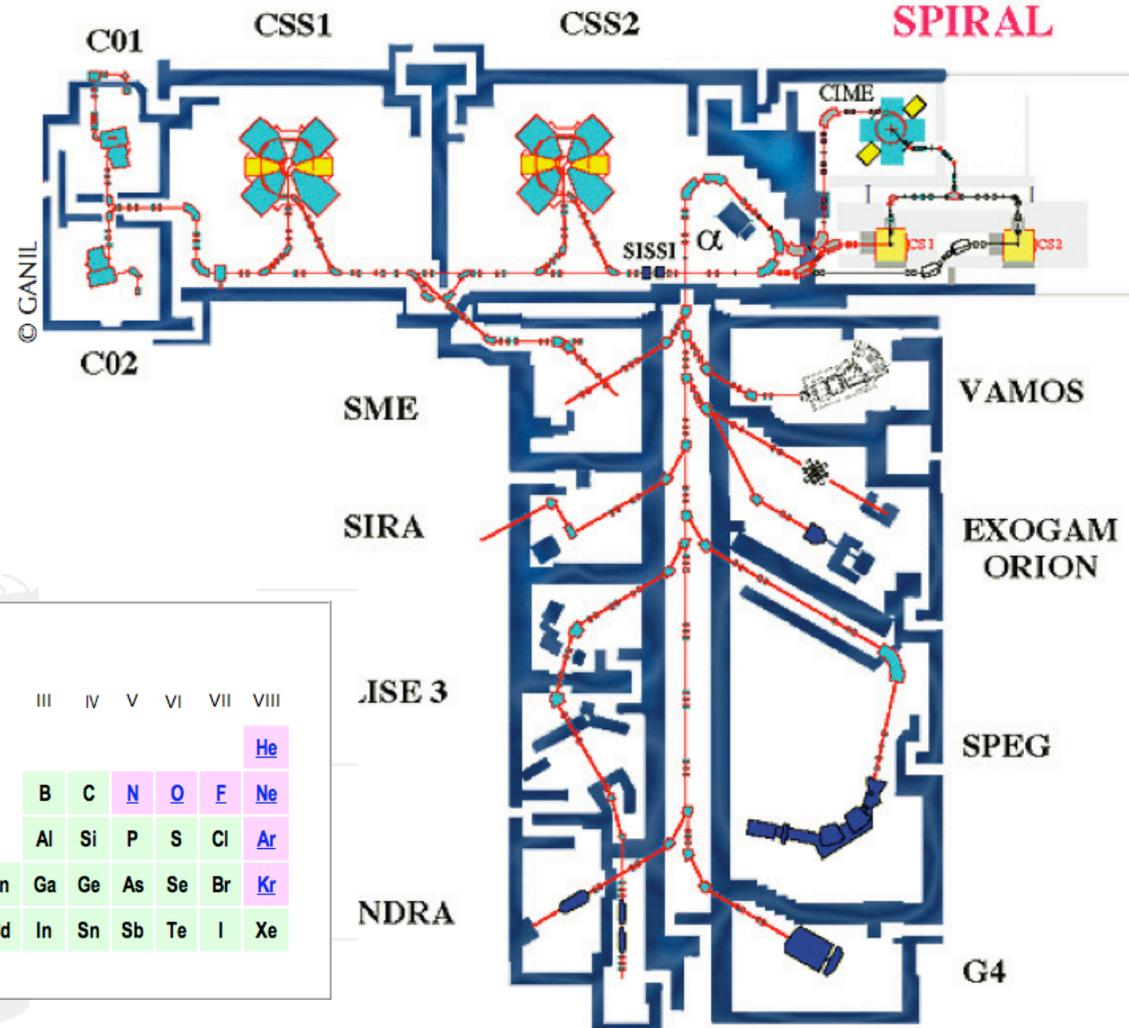
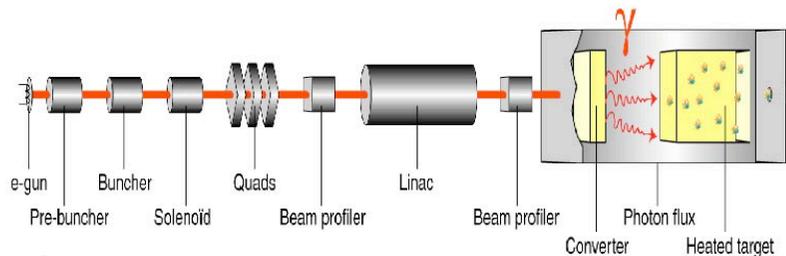


Table of elements

	I	II		III	IV	V	VI	VII	VIII									
1	H								He									
2	Li	Be		B	C	N	O	F	Ne									
3	Na	Mg		Al	Si	P	S	Cl	Ar									
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Te	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe

7 éltis (8 isotopes)

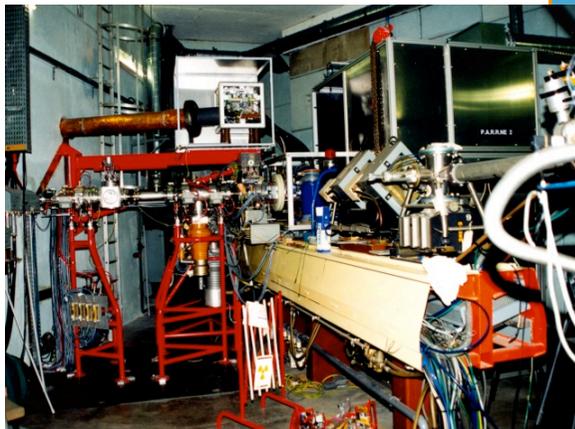
Technique 2: Fission induite par photons



ALTO

fission induite par photons
(photofission)

Caractéristiques faisceau :
Energie électrons : 10-50 MeV
Intensité : 10 μ A



ipn
orsay

Deflection vers l'ensemble cible-source

Section linéaire accélératrice

Vers le séparateur et les lignes d'expériences

Détails d'un ensemble cible-source

Vue 3D des installations sur le toit des aires expérimentales
Klystron

@ site WEB ►►► <http://ipnweb.in2p3.fr/tandem-alto>

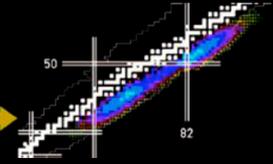
Accélérateur Linéaire ALTO
Installation au Tandem - De l'étude à la réalisation - panorama

ALTO
Accélérateur Linéaire au Tandem d'Orsay

+ technique ISOL
mais sans post-accélération

Demain: techniques 1 et 2 à haute intensité

Spiral2



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(14.5A MeV, 1mA, A/q=3 6) **(40MeV, 5mA)**



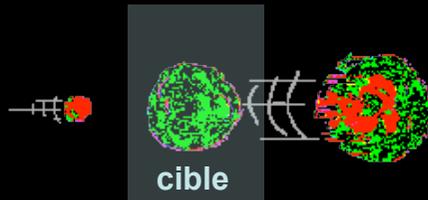
convertisseur C



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



Dans les quelques années à venir



équipements existants

CIME
accélérateur
 $E < 25$ A MeV

faisceau basse
énergie Lirat

faisceau d'ions
lourds stables

linac supraconducteur (45m)
 $E = 14.5$ 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

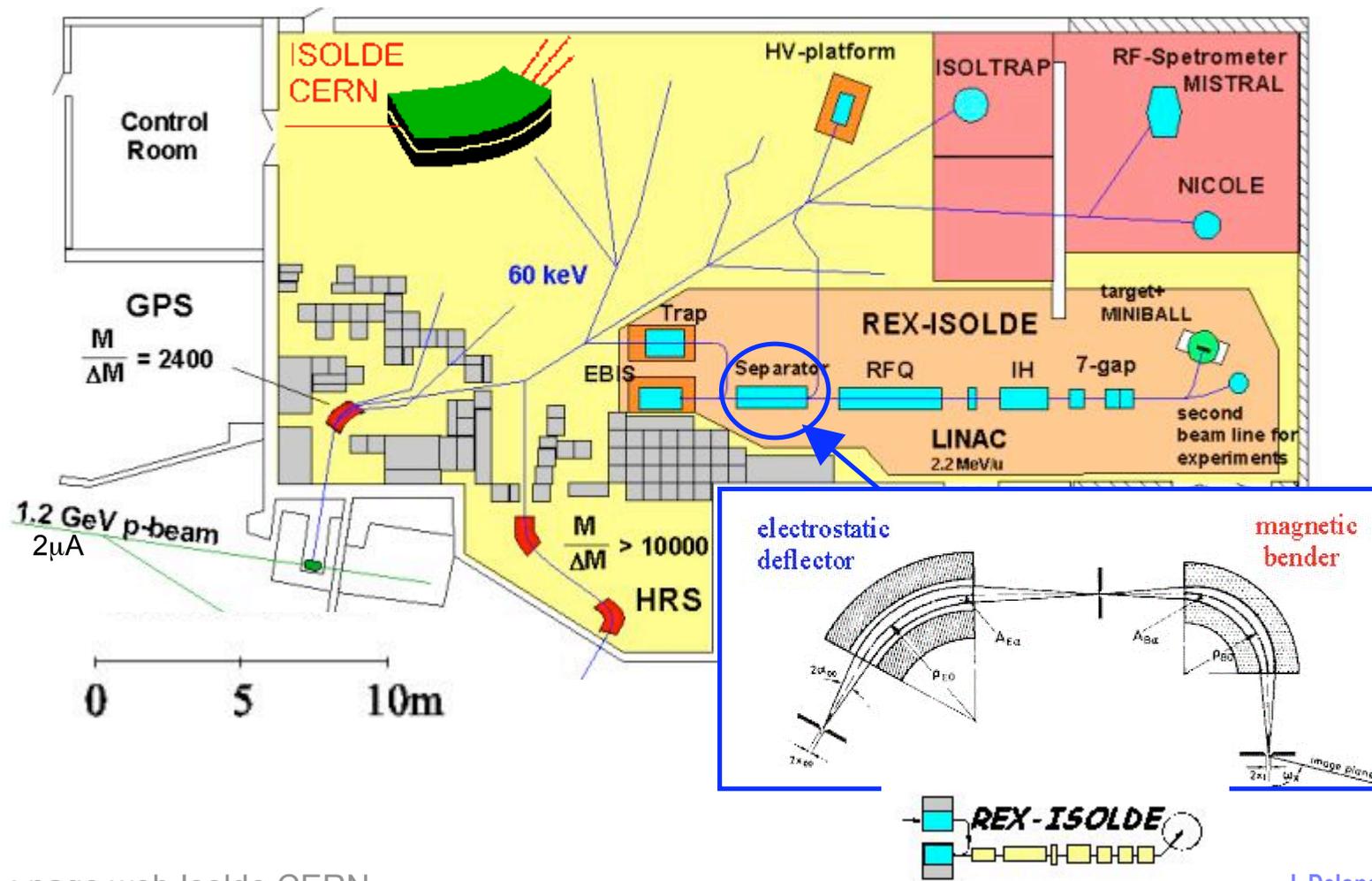
RFQ

Sélection des produits de réaction primaire
pour obtenir un faisceau secondaire
radioactif et exotique

Séparation de faisceau: spectromètres

ISOL : Isotopic Separator On Line

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



1^{ère} étape Déflecteur électrostatique (Rex-Isolde)

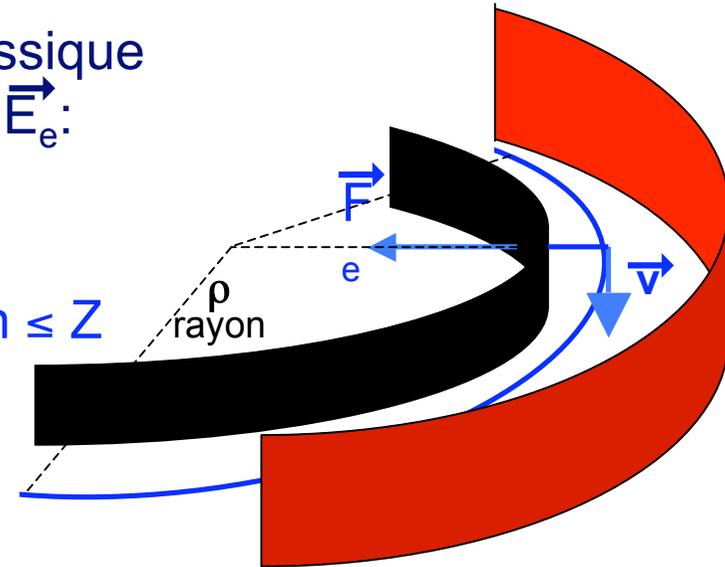
electrostatic deflector



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

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

Q charge de l'ion $\leq Z$



trajectoire 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 $A c^2$, $A = Z + N$)

$\Rightarrow \rho = M v^2 / Q \times 1 / E_e$

Fenêtre sur ρ :

\Rightarrow 1^{ère} sélection en rapport énergie sur charge (ou vitesse² fois A/Q)

\Rightarrow noyaux avec même $[(M/Q) v^2]$ au même pt en sortie...

soit beaucoup de noyaux :

$$(v^2, \text{ et } (M/Q)) \equiv (v^2, [M \pm m / (Q \pm q)])$$

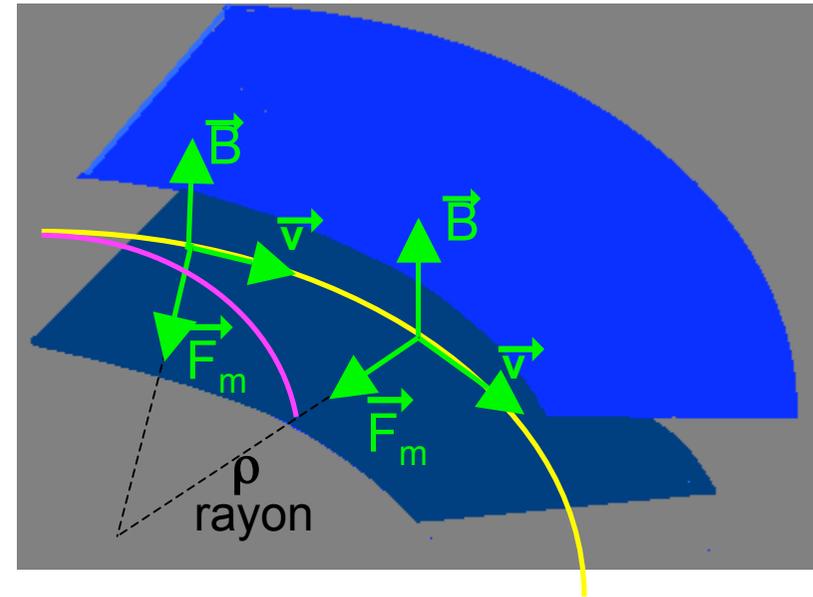
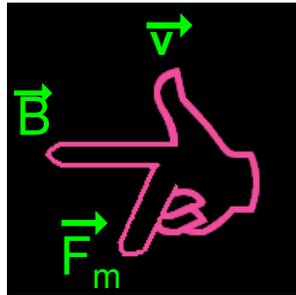
Ou 1^{ère} étape : Dipôle magnétique Lise (Ganil)

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



mvt circulaire si

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

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

$\Rightarrow \rho = (M/Q) v \times 1/B$

(mais on utilise $B \rho =$ rigidité magnétique)

Fenêtre pour ρ

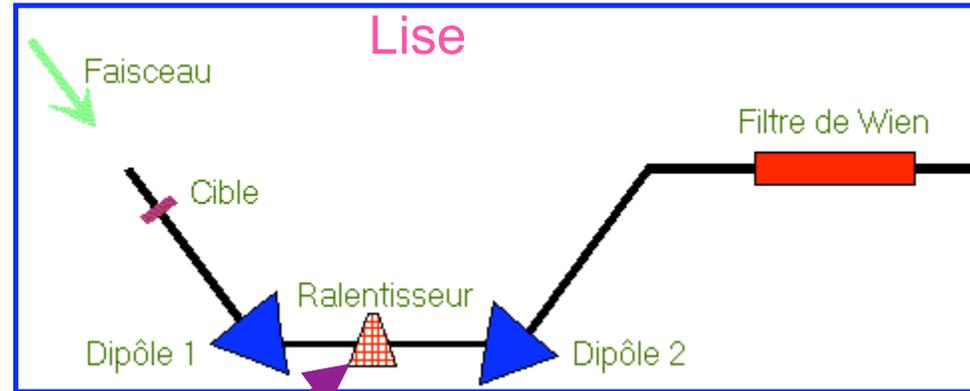
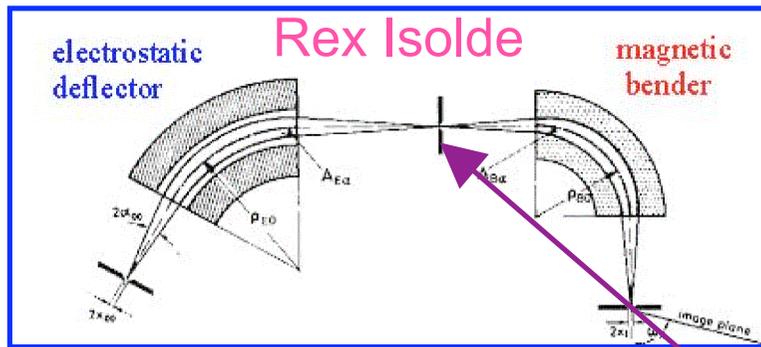
\Rightarrow noyaux avec même $[(M/Q) v]$ au même pt en sortie... (pas mieux)

\Rightarrow **Après E ou B : nécessité deuxième étape**

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

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

2 et 3^{ème} étape



source lise : site Ganil

Séparer les produits de réactions \Rightarrow **ralentisseur** (fine épaisseur de matière (Be))
 perte d'énergie relative d'un ion dans dégradeur $\Delta E/E \propto A^3/Z^2$

\Rightarrow on a modifié v pour les différents noyaux,

\Rightarrow on passe de $(v, \text{ et } (M/Q))$ à $(v', (M/Q))$

\Rightarrow pas au même rayon après

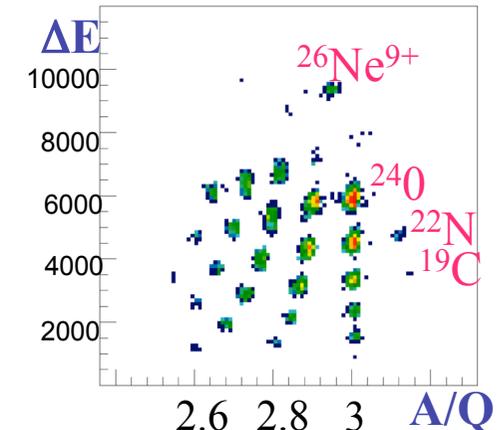
1 autre déflecteur E ou dipôle B...

$$B\rho \rightarrow (B\rho)' = B\rho + \Delta B\rho$$

$$\text{et corrélation } \Delta B\rho/B\rho = \frac{1}{2} \Delta E/E$$

Enfin, on peut encore affiner: 4^{ème} étape (Lise au Ganil)

Filtre en vitesse (Wien) $B + E$: transmission que 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)**

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

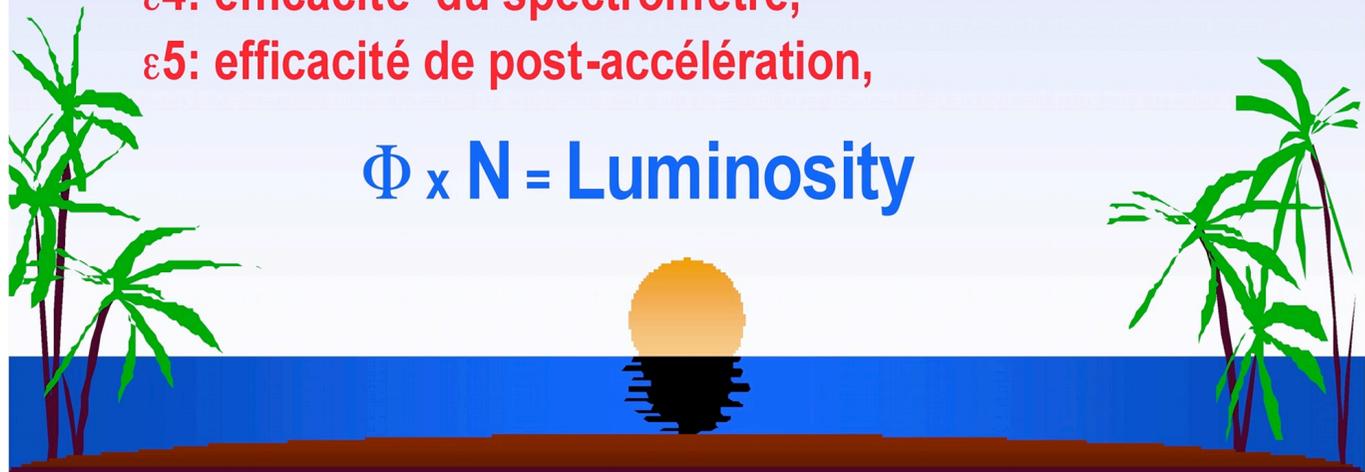
$$I = \sigma \times \Phi \times N \times \varepsilon_1 \times \varepsilon_2 \times \varepsilon_3 \times \varepsilon_4 \times \varepsilon_5$$

σ : section efficace, Φ : intensité faisceau primaire,
 N : épaisseur de cible,

ε_1 : efficacité de relâchement et transfert des produits,
 ε_2 : efficacité de la source d'ions ,

ε_3 : efficacité de perte due à la décroissance radioactive,
 ε_4 : efficacité du spectromètre,
 ε_5 : efficacité de post-accélération,

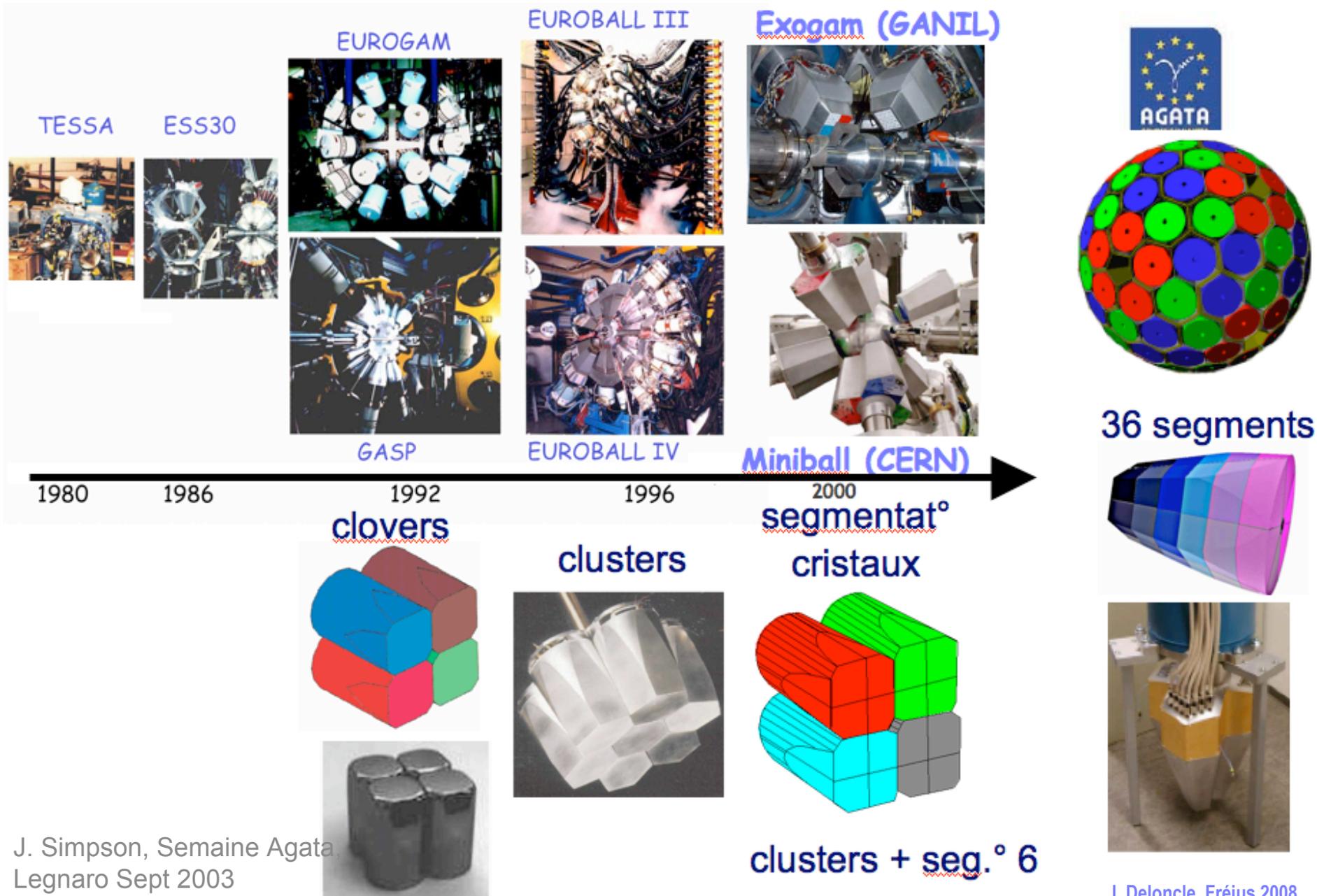
$$\Phi \times N = \text{Luminosity}$$



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

Détecteurs autour de la réaction
faisceaux radioactifs et cible
(rq: bien sûr aussi utilisables avec
nos loyaux faisceaux stables)

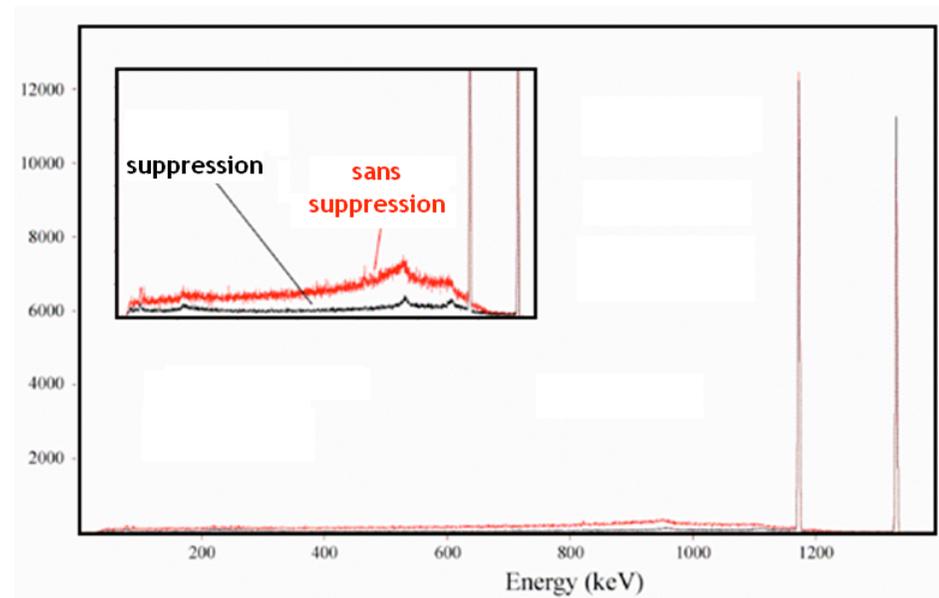
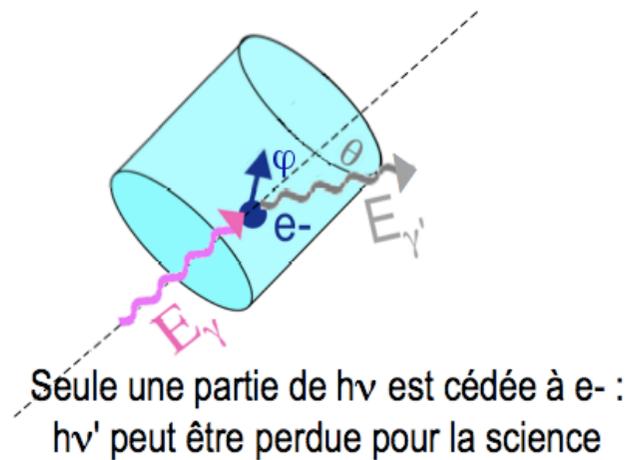
Détecteur Germanium: la Next Generation



J. Simpson, Semaine Agata, Legnaro Sept 2003

I. Deloncle, Fréjus 2008

Une lutte contre la diffusion Compton



sans suppression : P/T ~ 30%

avec suppression : P/T ~ 50%

Diffusion Compton

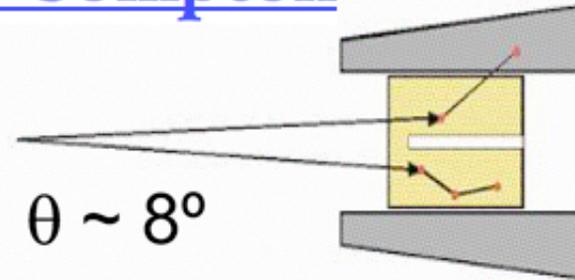
Ge avec bouclier anti-Compton

ϵ_{ph} ~ 10%

N_{det} ~ 100

Ω ~ 40%

$\theta \sim 8^\circ$

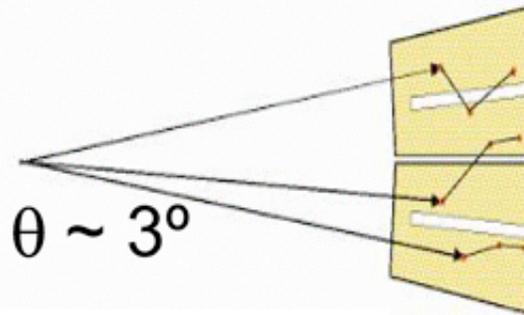


Sphère de Ge

ϵ_{ph} ~ 50%

N_{det} ~ 1000

$\theta \sim 3^\circ$



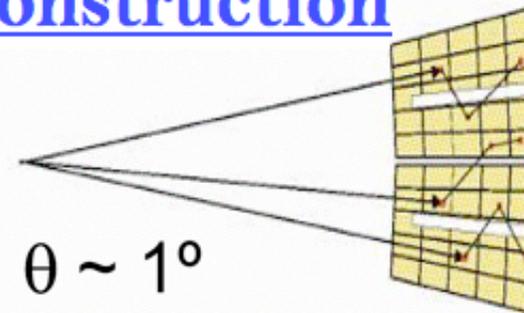
Groupe de Ge avec reconstruction

ϵ_{ph} ~ 50%

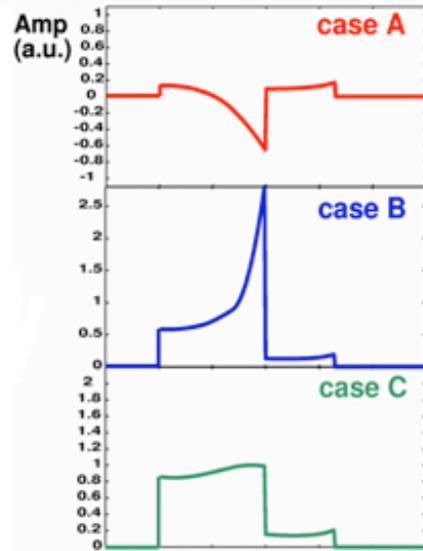
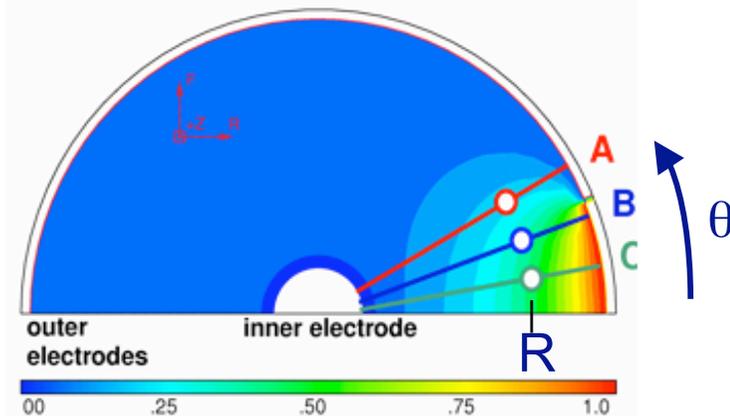
N_{det} ~ 100

Ω ~ 80%

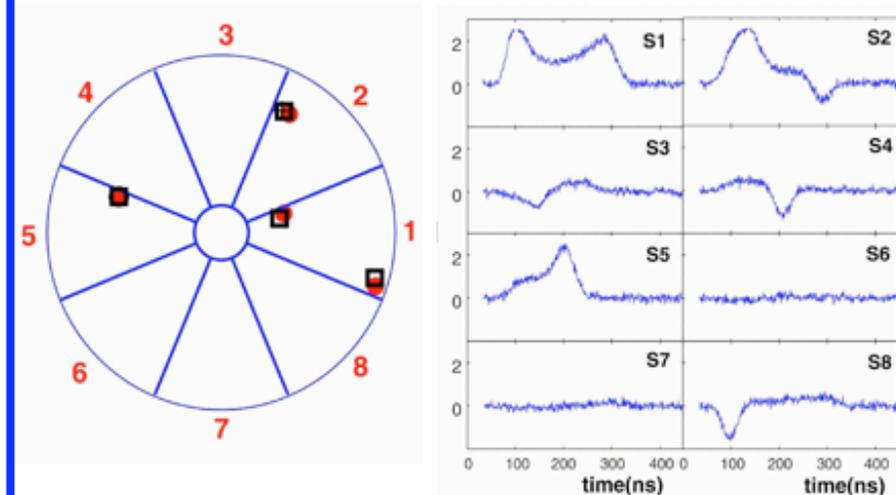
$\theta \sim 1^\circ$



Segmentation des détecteurs



Signaux induits par trois interactions ayant lieu à des angles différents mais même 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.

Dans segment 1:
deux distances radiales différentes \neq
 \Rightarrow 2 signaux distants

Et contre l'effet Doppler

Animation !

Ce qu'elle entend quand elle lui joue du violon sur le train qui s'en va ou s'en revient
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 avec vitesse (valeur, direction) émetteur

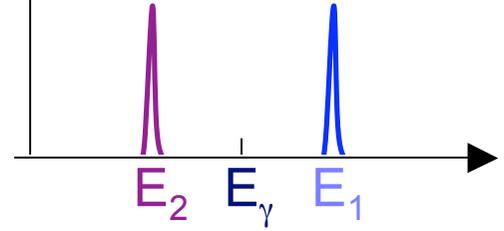
γ : fréquence \Leftrightarrow énergie ($E = h\nu$, ν fréquence) $\gamma \Rightarrow$ énergie détectée pas bonne !

θ : angle entre direction \vec{v} et direction observateur/détecteur

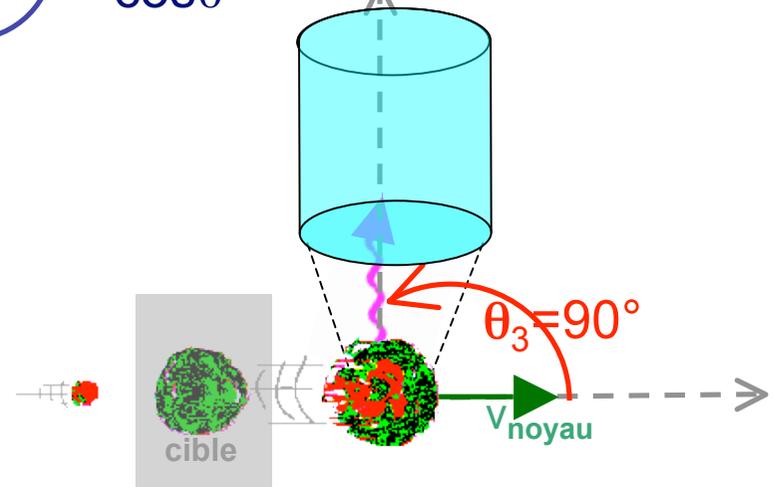
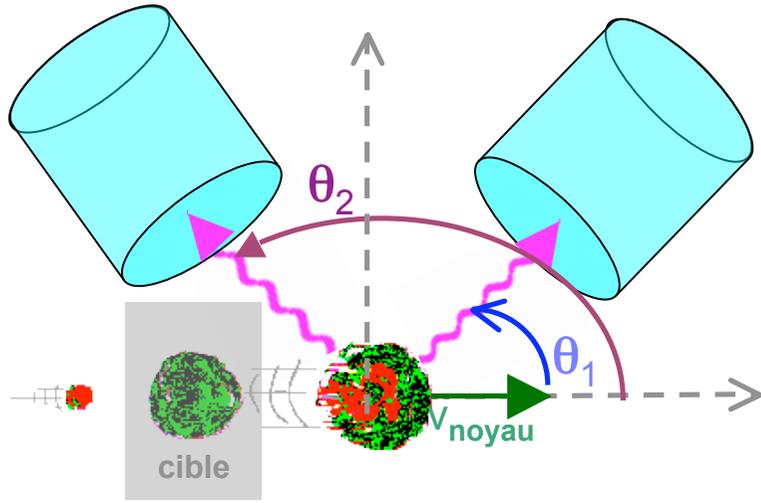
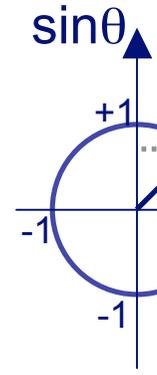
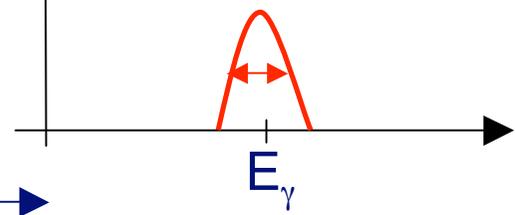
On a : $E_{\text{dét.}} = E_{\gamma} \left(1 + \frac{v_{\text{noyau}}}{c} \cos\theta\right)$ donc

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

décalage doppler: $\theta \neq 90^\circ$

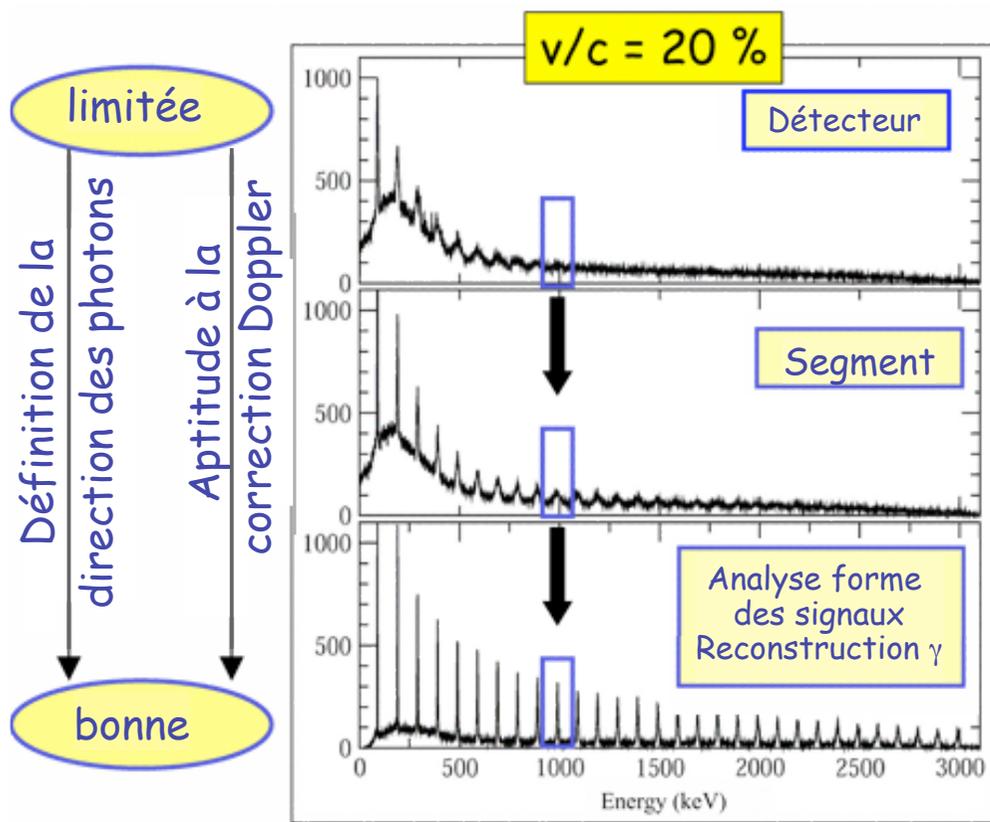


élargissement doppler: $\theta = 90^\circ$

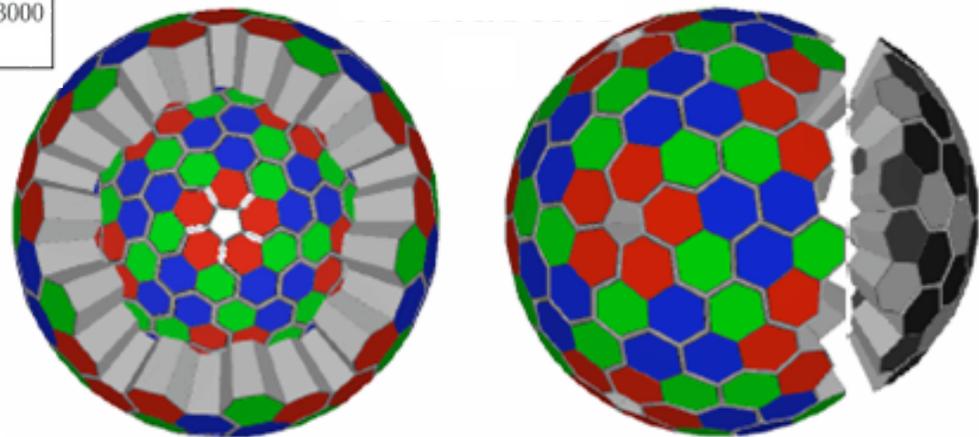


\Rightarrow réduire la taille des détecteurs ou des segments

Effet Doppler et Agata

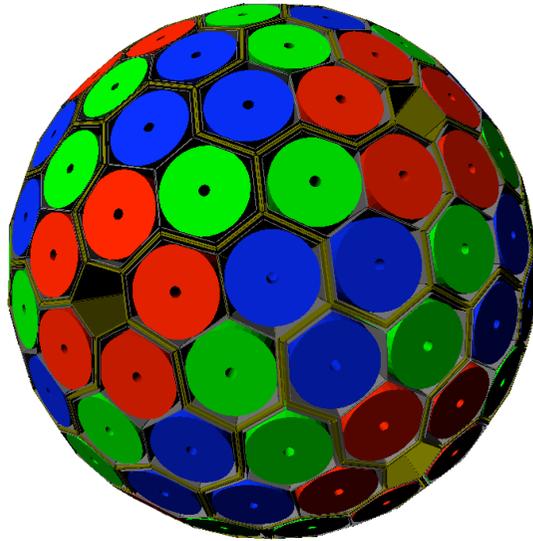


2012: 20 Clusters ($1/3\pi$),
9 Avril 2010: 20 Clusters, 5 clusters
2013: installation au GANIL



Farnea CSSP, Mamaia-Constanta, Roumanie, Juin 2005,
Actualisé avec Nolan, AGATA-feb10, [npg.dl.ac.uk/AGATA/UK/..](http://npg.dl.ac.uk/AGATA/UK/)

Caractéristiques d'AGATA



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

180 cristaux Ge gros vol.

segmentés en 36 élt,

assemblés en 60 triple- "clusters" (trèfle)

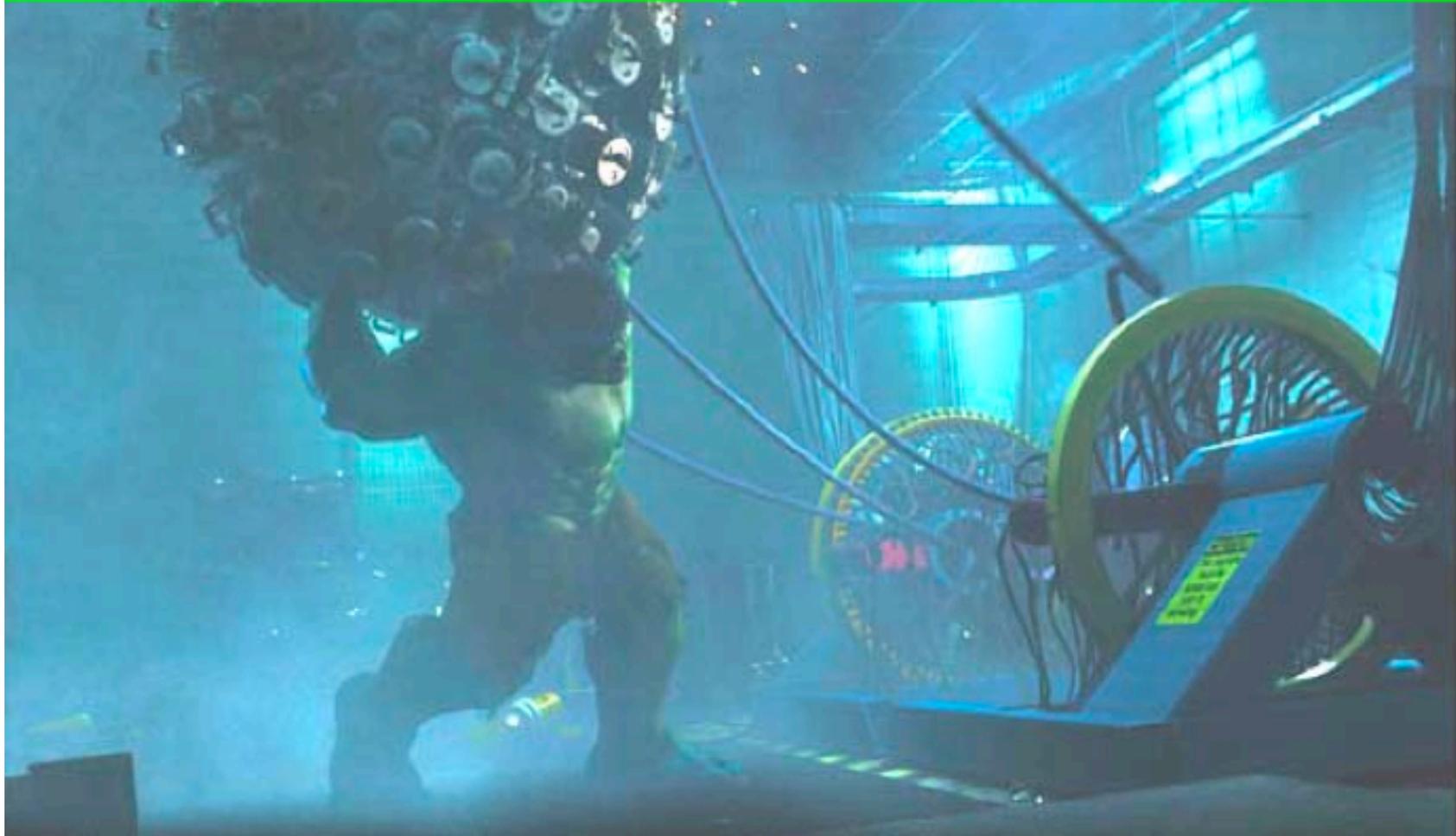
⇒ ~340 kg de Ge en 6480 élt : 6660 voies électroniques

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

→ reconstruction des parcours de γ

Une reconversion des boules de Ge "classiques"....

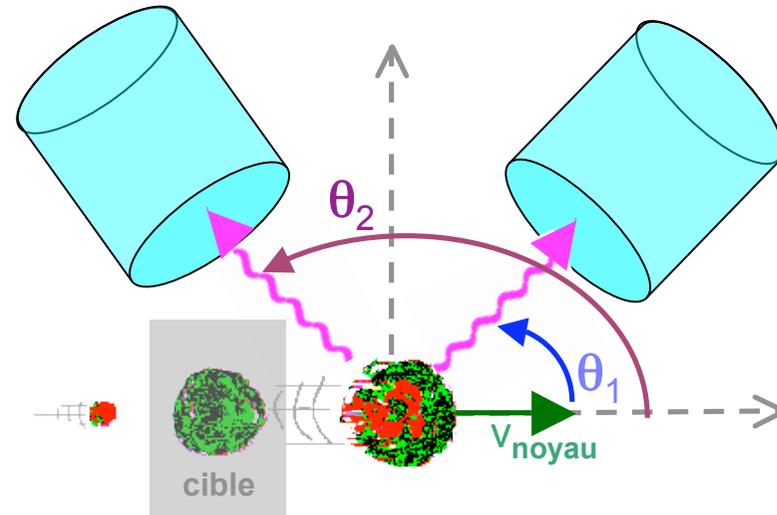
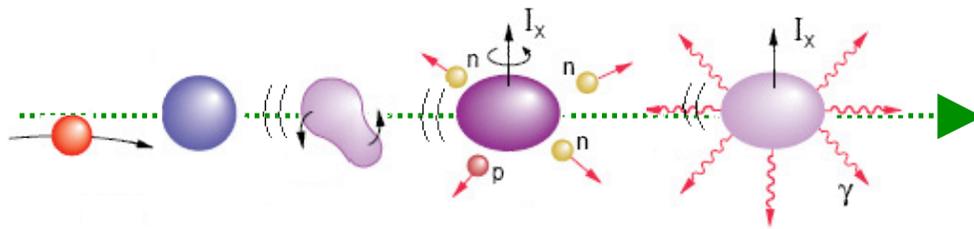
**The recent move of Gammasphere, thanks again to certain
SUPER-HEROES, has gone very well.**



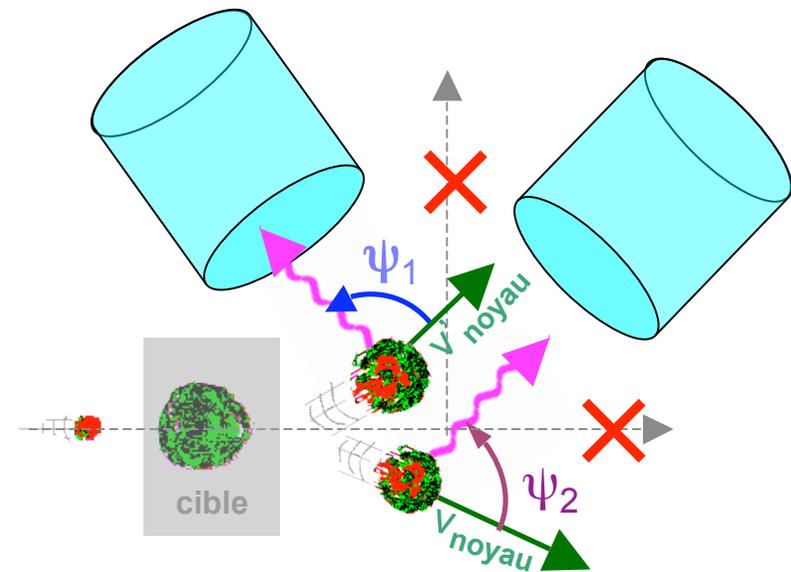
Retour sur Effet Doppler

Correction Doppler impose soit des réactions très 'piquées' vers l'avant :

ex: fusion-évaporation



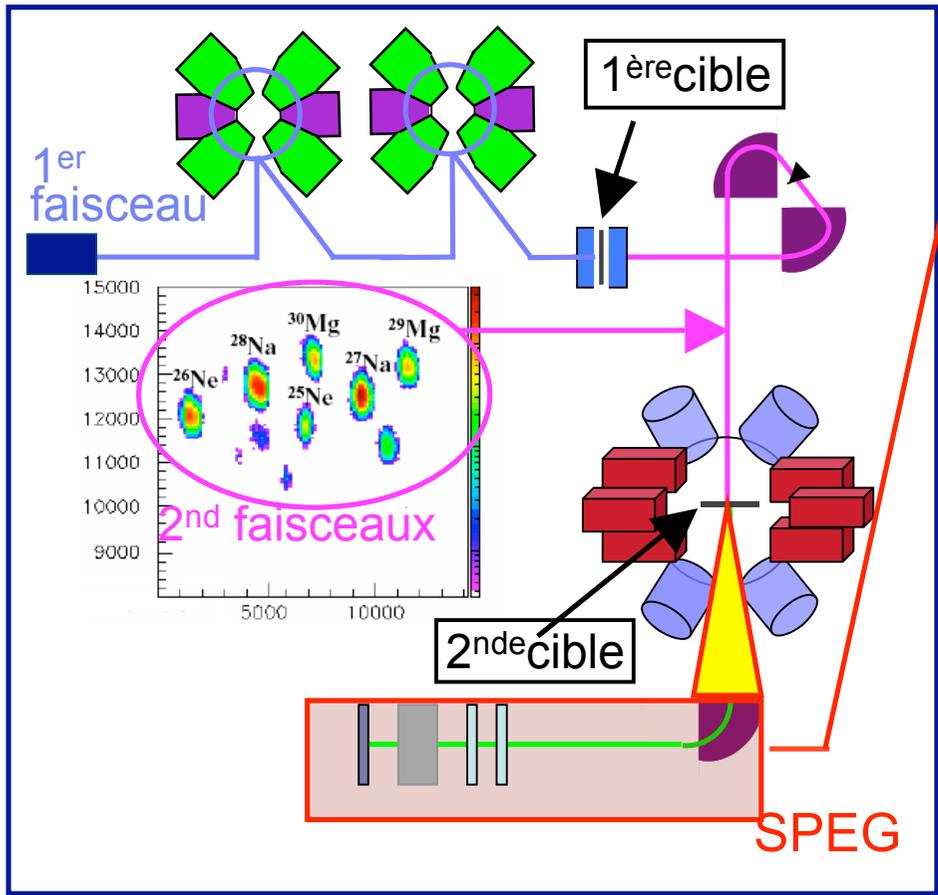
Mais fission/fragmentation....:
fragments émis dans toutes directions,
repère labo n'est plus adapté
(v pas // axe du faisceau)



⇒ détecteur aval pour mesurer direction et v_{noyau} : spectromètre

Détecteurs aval après réaction faisceau exotique/cible

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.spi>

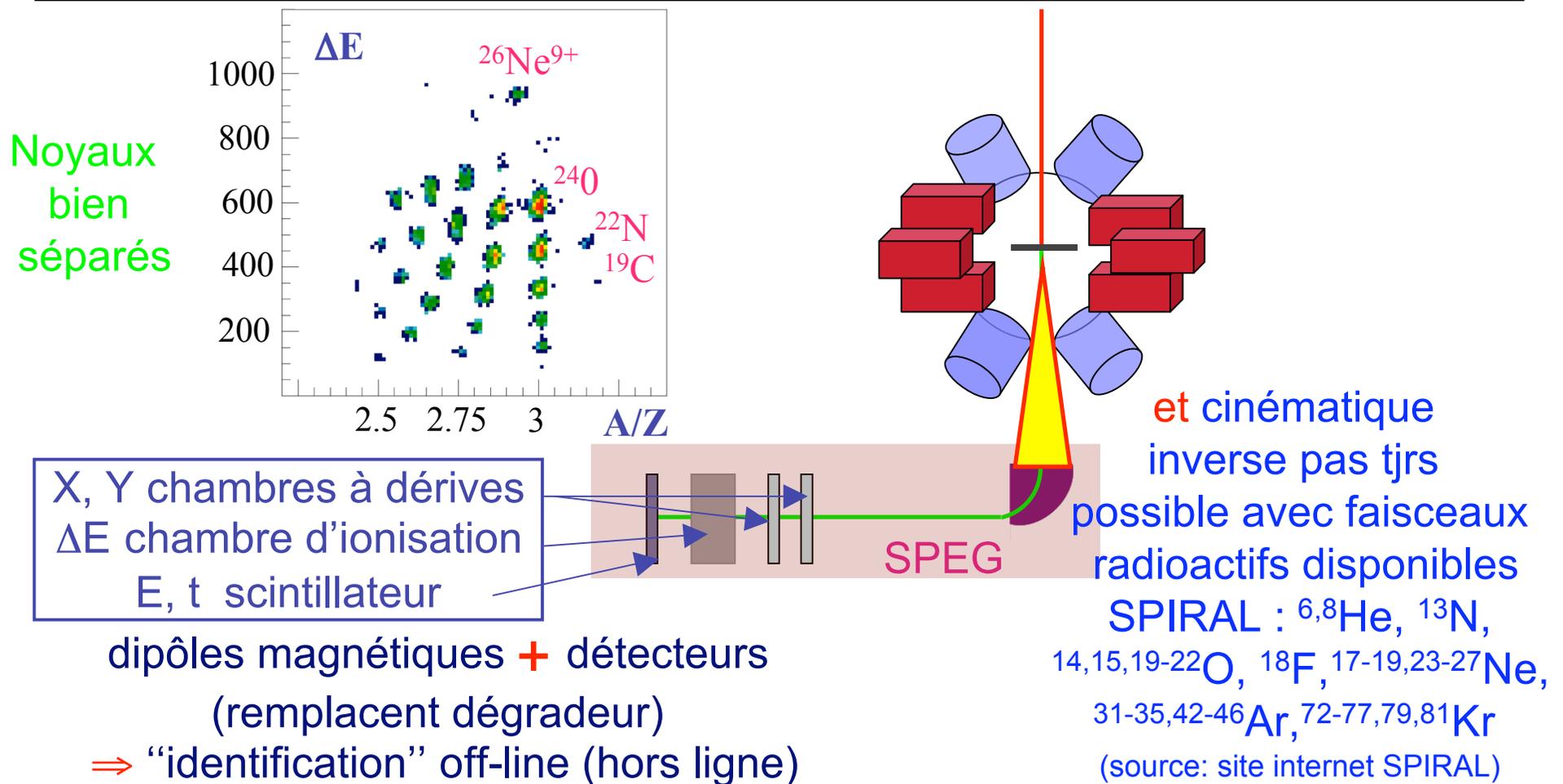
<http://www.spi>

On ne craint rien en arrière

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

mais accélérer un projectile lourd + coûteux en énergie

De SPEEG à Vamos: évolution Spectromètres d'aval



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° (fonction de filtre de vitesse)

Vamos pour SPIRAL

angle variable de 10 à 60°

séparation en v

Filtre de Wien

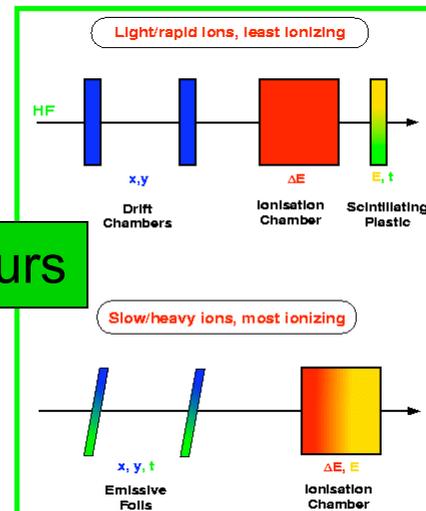
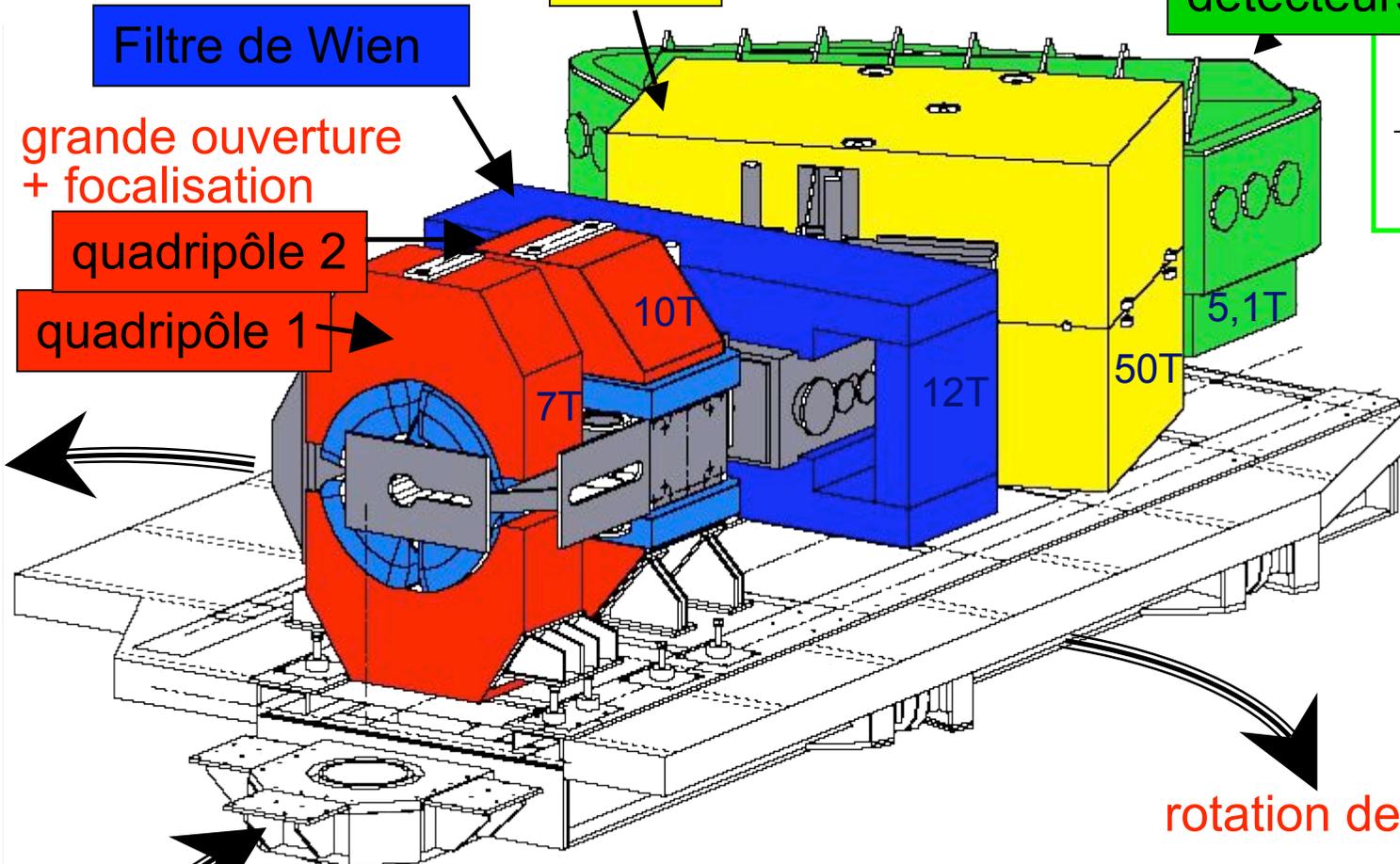
grande ouverture
+ focalisation

quadripôle 2

quadripôle 1

dipôle

détecteurs

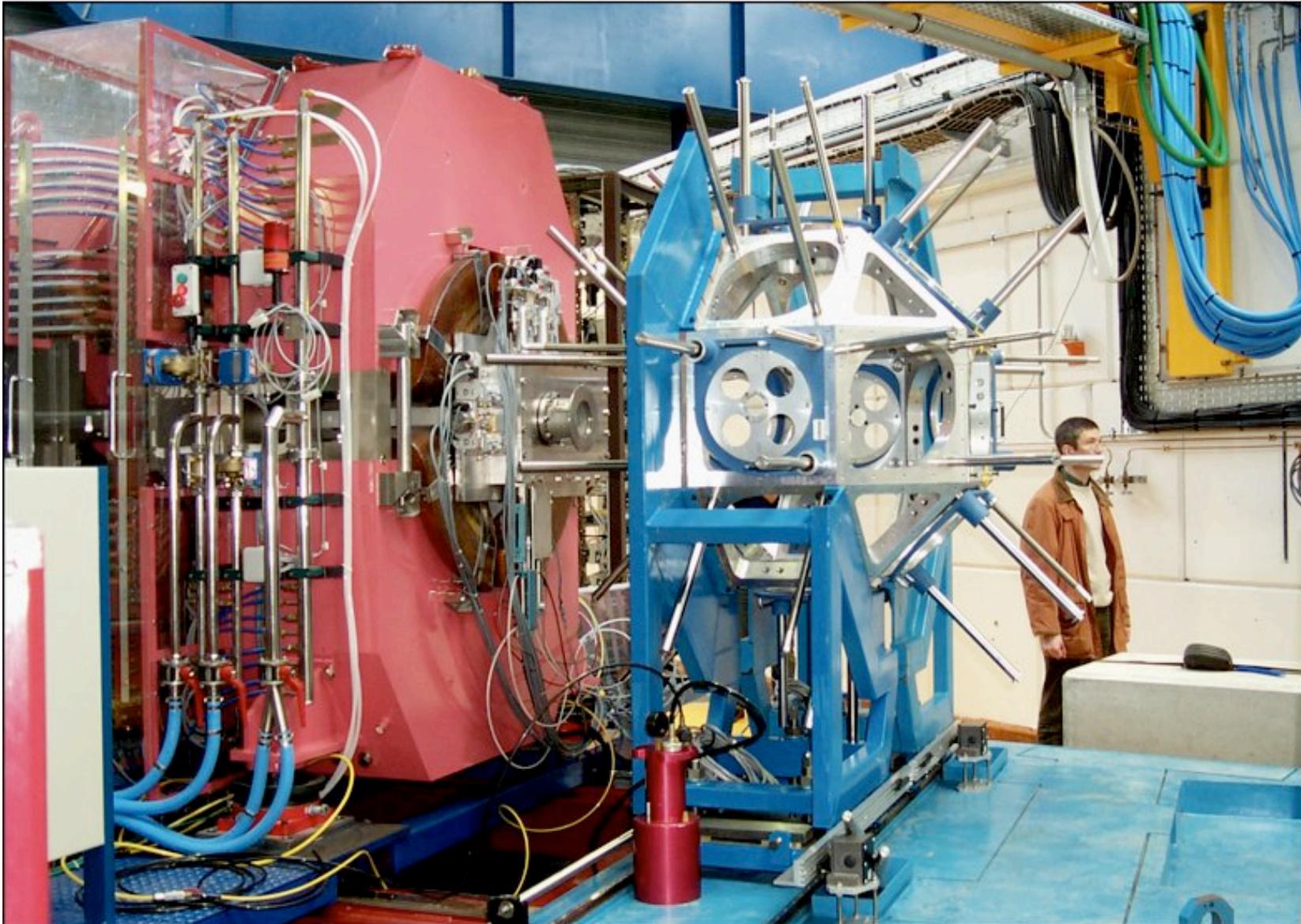


rotation de $\sim \pm 90^\circ$

translation:
distance à la cible de 0,4 à 1 m

masse totale embarquée 85T : une locomotive !

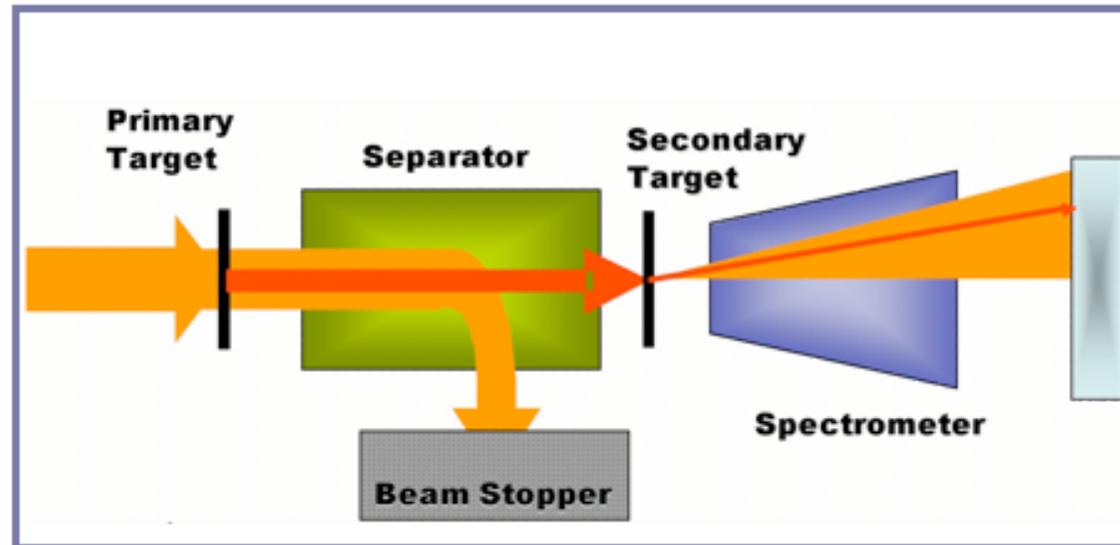
Vamos en vraie grandeur



Pour Spiral2 un nouvel outil Amont/Aval



S³: The Super Separator Spectrometer for LINAG Beams



Tout-en-un (distances réduites)

1 séparateur de faisceaux

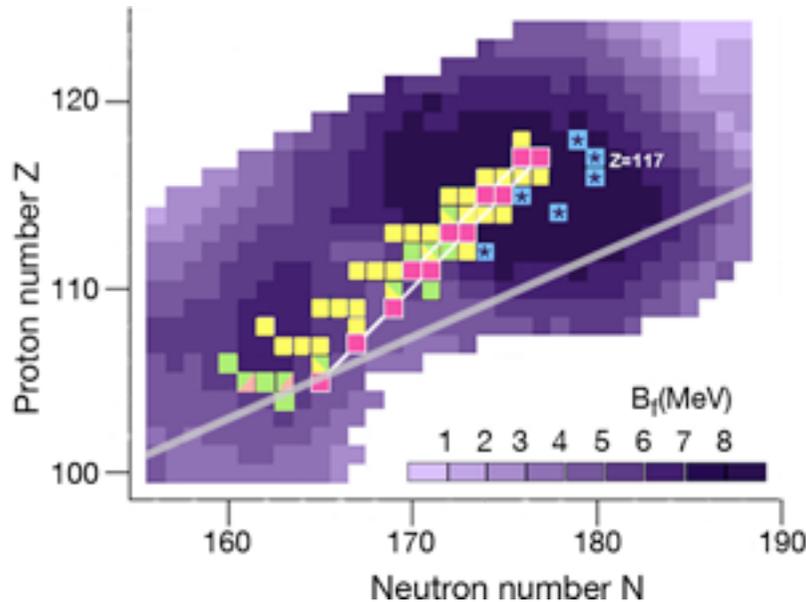
1 cible (rotative) supportant gde intensité

1 spectromètre de recul mobile (tel VAMOS) et ses détecteurs (filtre wien,...)

Outil particulièrement adapté pour une exploration ...

S3 : outil de la quête des Superlourds

Et très difficilement accessibles surtout avec des faisceaux stables...



Z=114, 120, ou 126 en protons
N=172 et 184 en neutrons.

=> Les superlourds a synthétiser

ununquadium-298 (Z=114, N=184)

unbinilium-304 (Z=120, N=184)

unbihexium-310 (Z=126, N=184) doublet magique

113: Ununtrium	286Uut	19.6 seconds
114: Ununquadium	289Uuq	2.6 seconds
115: Ununpentium	289Uup	220 ms
116: Ununhexium	293Uuh	61 ms
117: Ununseptium	294Uus	78 ms (2010, 150j)
118: Ununoctium	294Uuo	0.89 ms (pas clair)

Créés par réaction de fusion-évaporation avec un noyau (double^t) magique

Ex: Z=118: Projectile 48Ca, cible 248Cf

0,3 pb oui

Ou

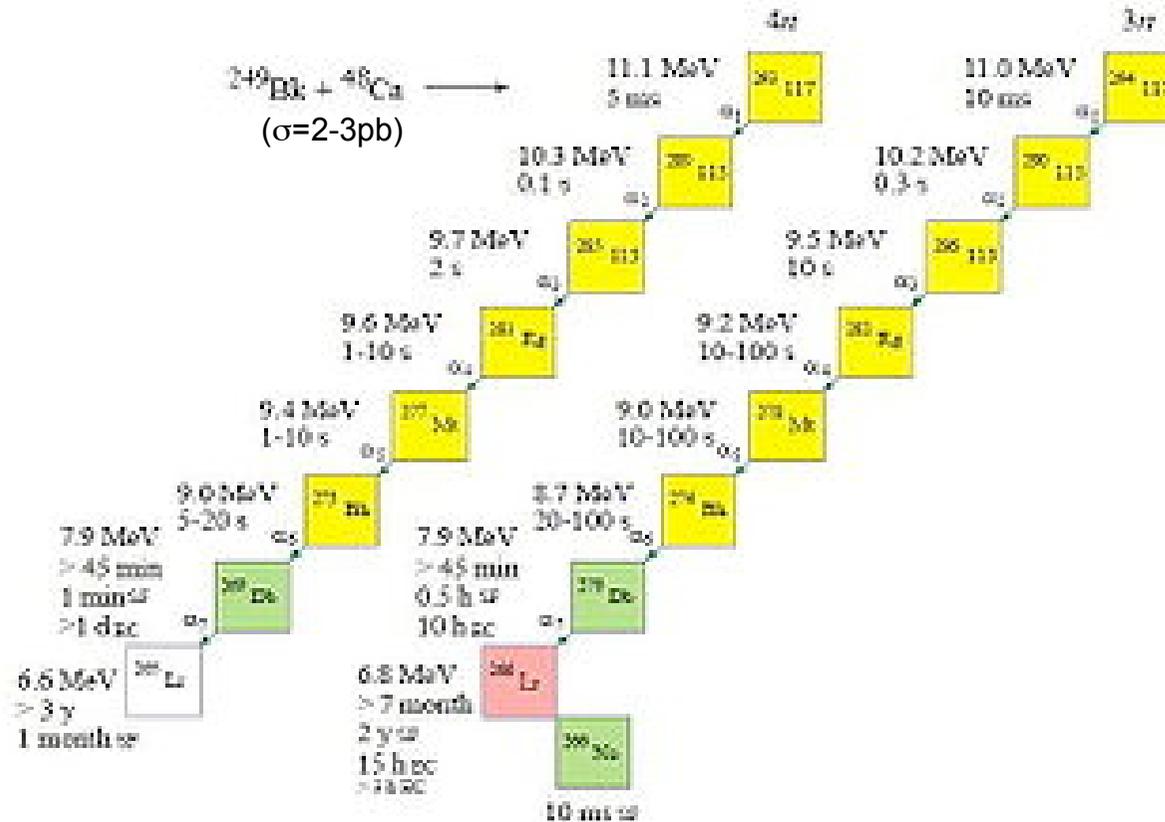
86Kr

208Pb

0,1 pb non

Une chaîne de décroissances alpha

Implantation dans détecteur Si "pixellisé"



GSI n'a pas de ^{249}Bk ($T_{1/2}$: 320j)

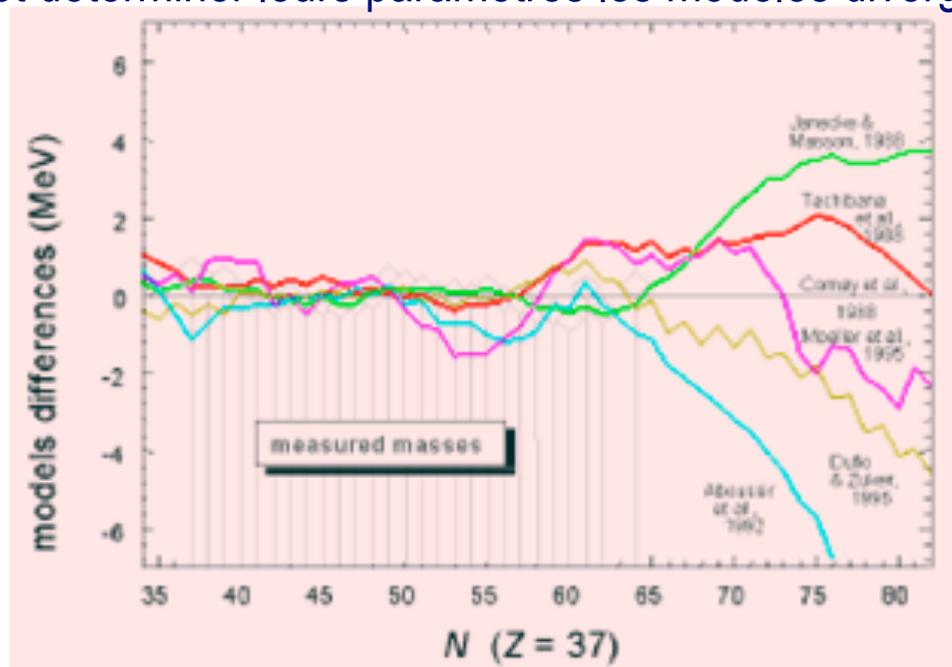
Crée à LBL après 250 j d'irradiation neutrons

...l'ambiance reste à la compétition dont le nombre de compétiteur s'élargit

Exemple de mesures de structure nucléaire: 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

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

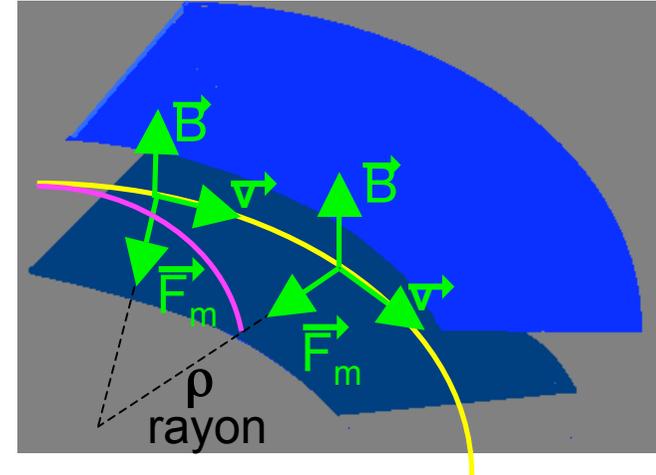
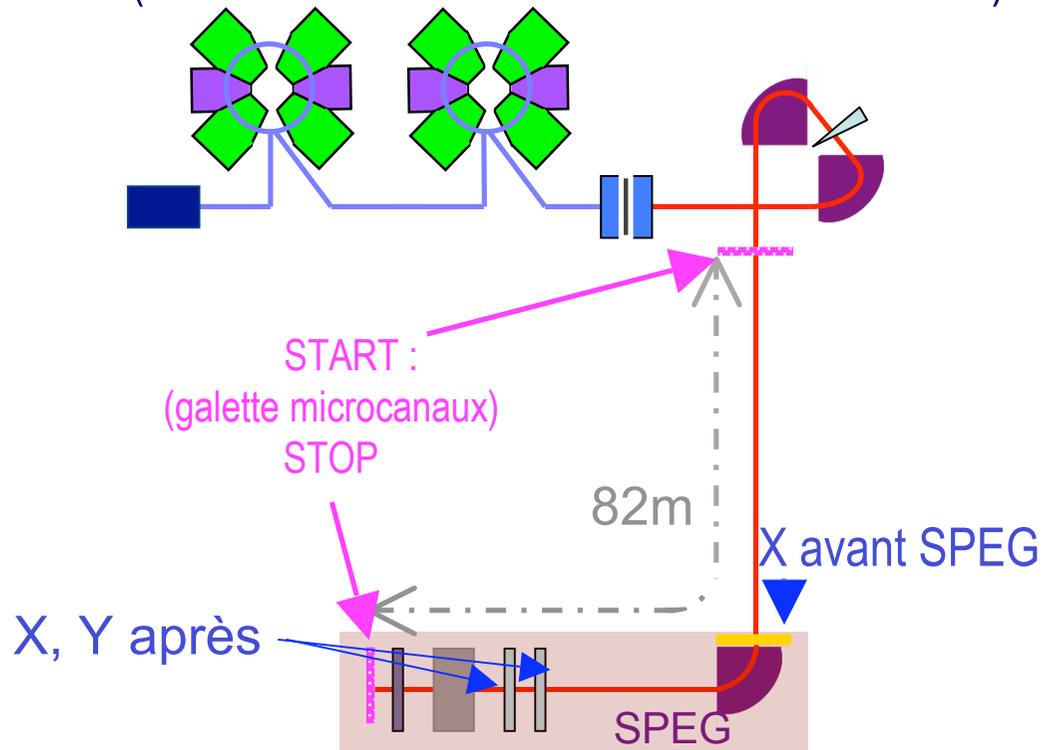
$$\Rightarrow QvB = M v^2 / \rho \quad (M = Ac^2, A = Z+N)$$

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

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

\Rightarrow il suffit de mesurer ρ 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

$$F = m a \Rightarrow QvB = M v^2/\rho$$

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

$\Rightarrow \rho$ dépend de v

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

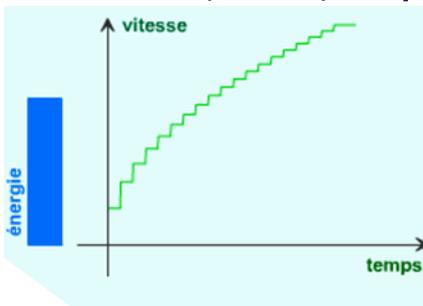
$\Rightarrow f$ (cyclotron) indt de ρ et de v



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 :

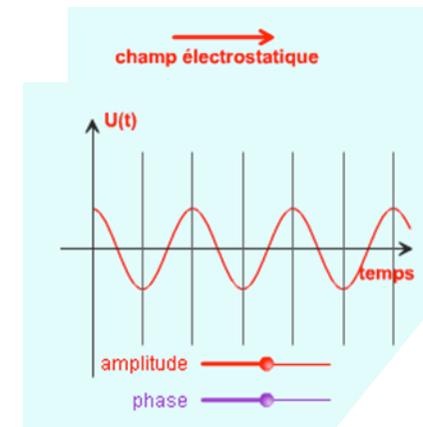
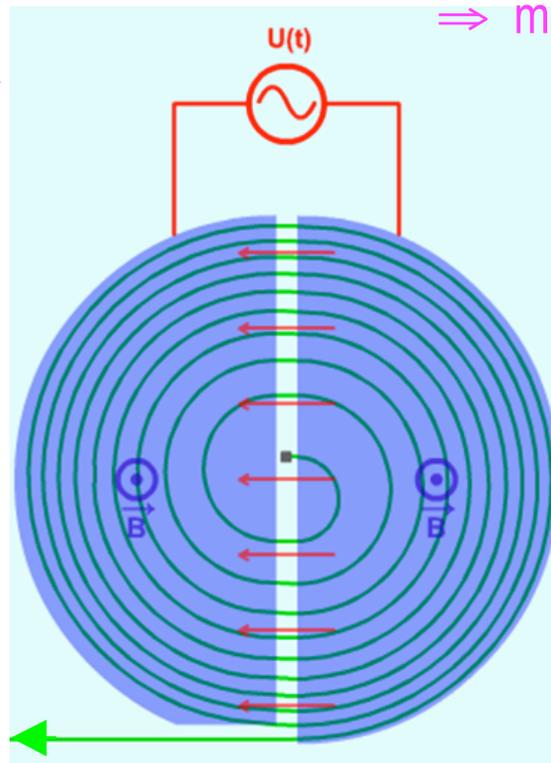
une force en plus $F = Q E$

Principe Fondamental Dynamique (PFD)

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

ρ dépend de v , $\rho \nearrow$

\Rightarrow mouvement en spirale



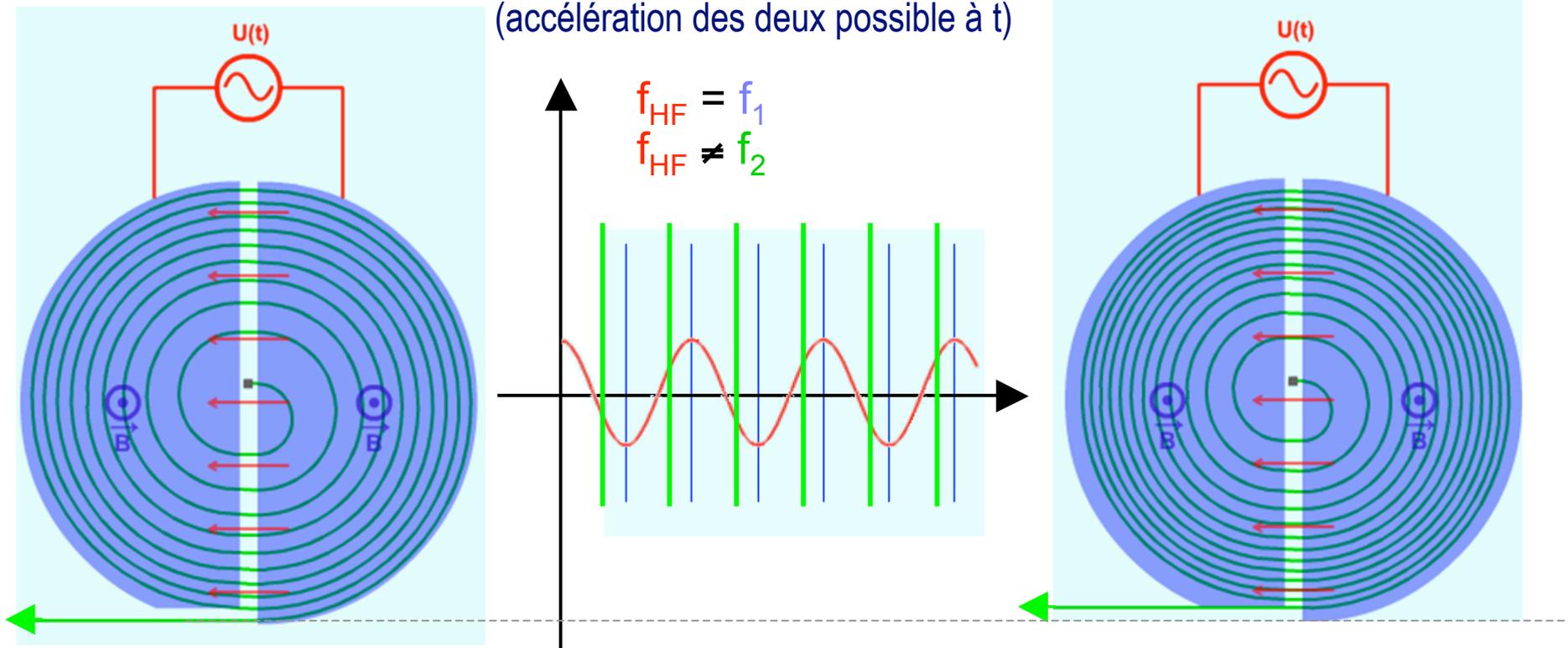
Animation :

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.htm>

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 $dv_1 \gtrsim dv_2$
 ~ 200 tours $\Rightarrow v_1 > v_2, t_1 - t_2 > 0$
 200 tours $\Rightarrow d \sim \text{km} !!!$ précision \nearrow

Des faisceaux ≠ dans cyclotron

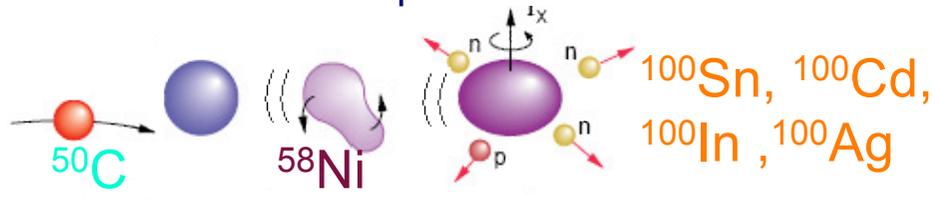
M. Chartier et al., PRL 12 Vol. 77 (1996) 2400, Hyp. Int. 132 (2001) 275

Première étape :

Avec 1^{er} 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}Ag masse bien connue

Seconde étape :

Réaction sur cible épaisse entre CSS1 et CSS2

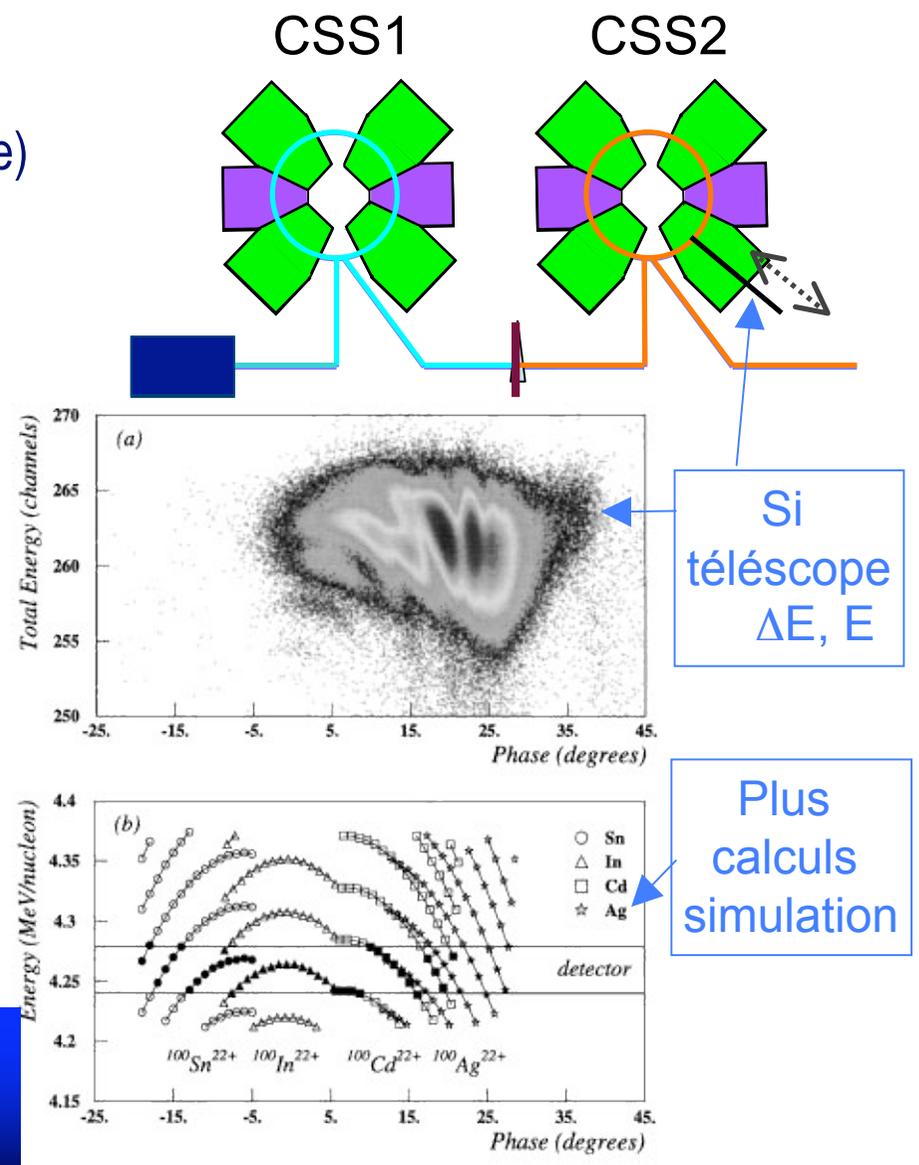


seuls leurs 22+ pourront être accélérés
 dans CSS2 (tolérance $2 \cdot 10^{-4}$)

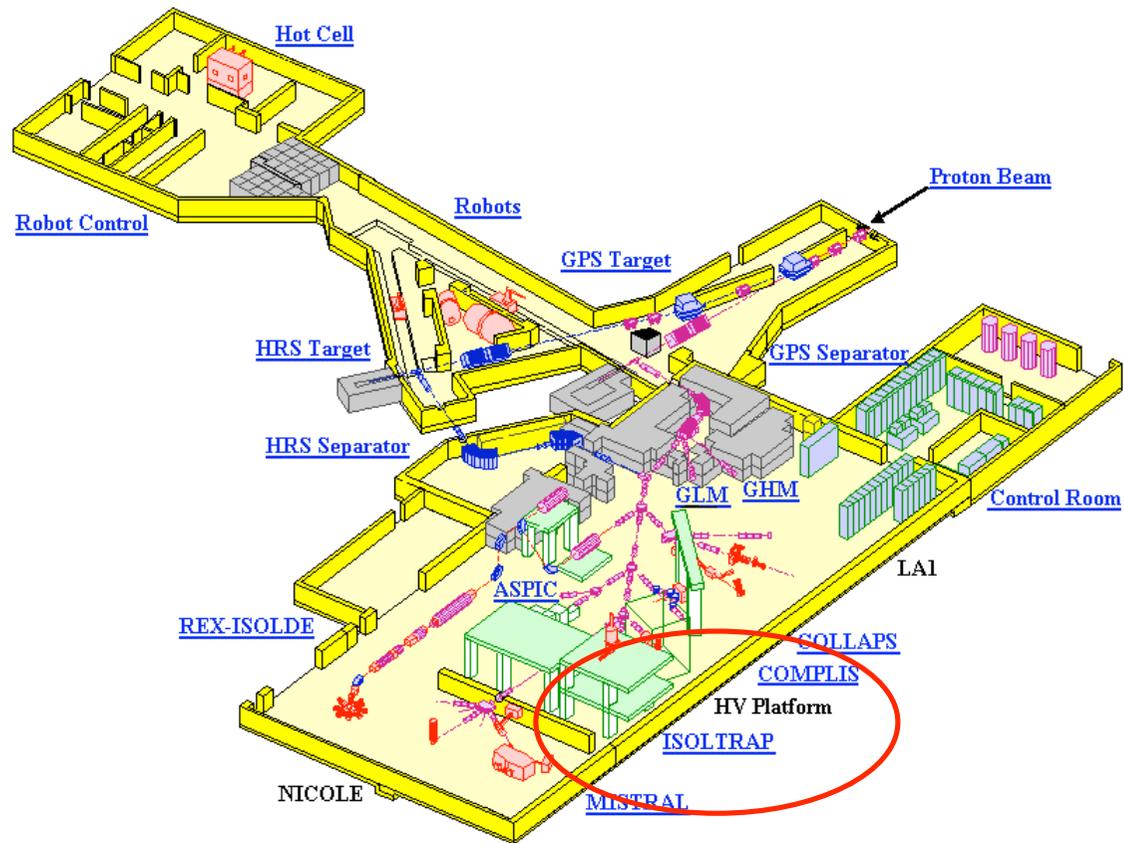
Troisième étape :

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 $\delta M/M = 3 \cdot 10^{-6}$ pour In
 et $\delta M/M \simeq 10^{-5} \cdot 10^{-6}$



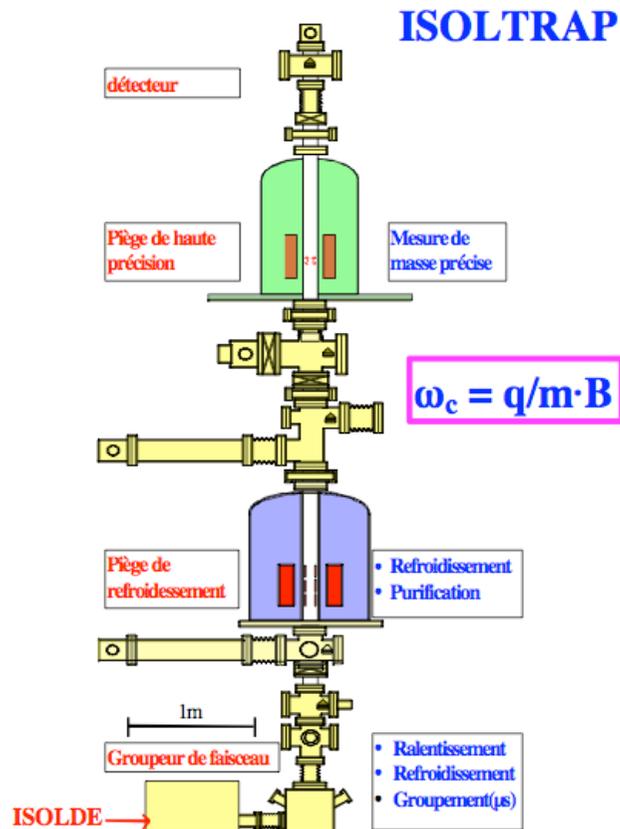
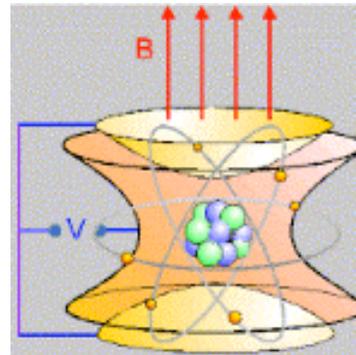
Sans post-accélération trappe: Isolde : Isoltrap



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

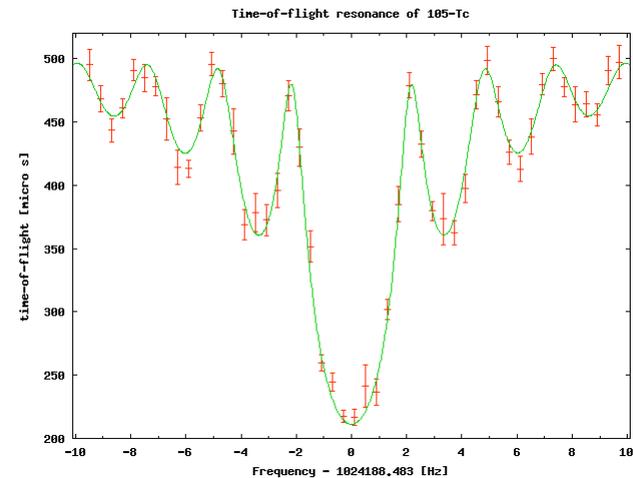
mesure de la fréquence cyclotron

Trappe de Penning



⇒ excitation avec E_{RF}
 Qd fréquence cyclotron
 Energie max

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

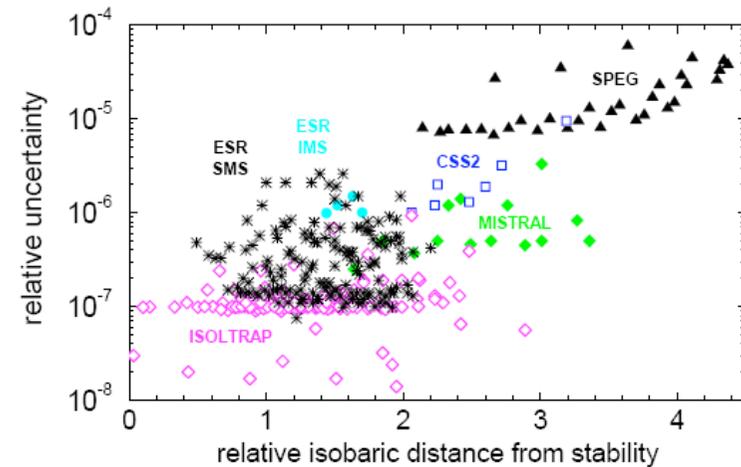
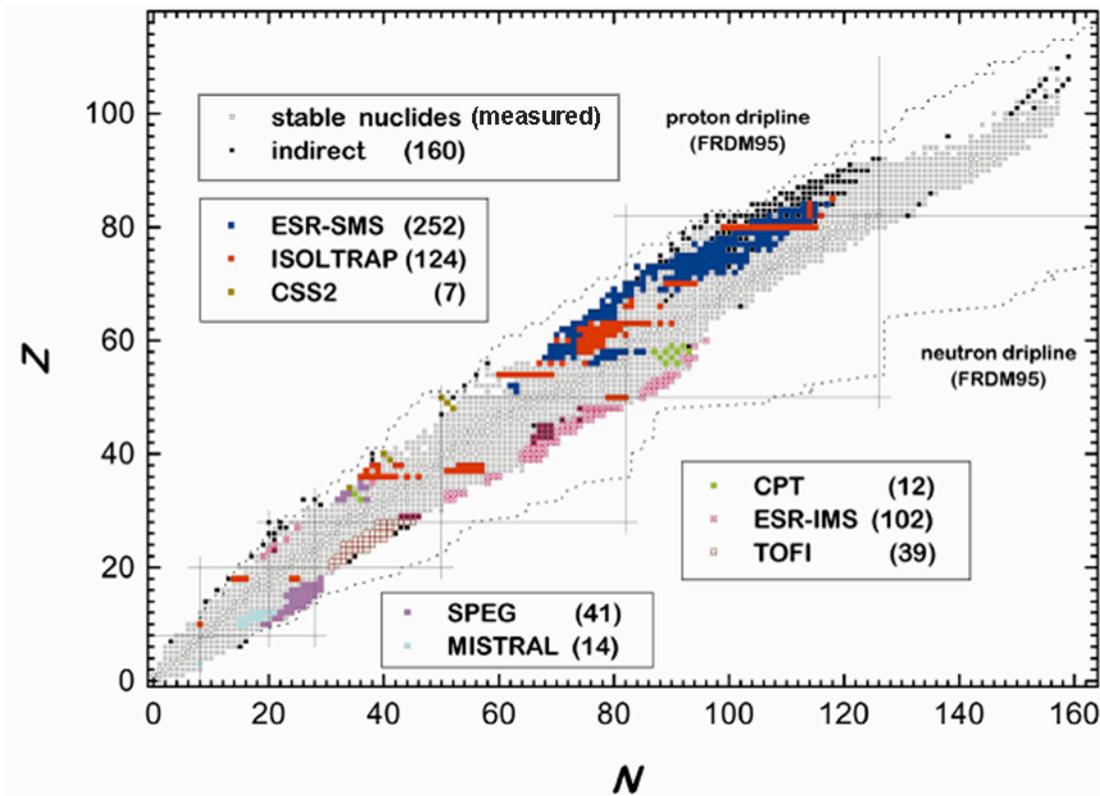


Mesure de temps de vol

si $f_{HF} = F_{cyclotron}$ $E = E_{max}$, $v = v_{max}$

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

Zones des masses mesurées



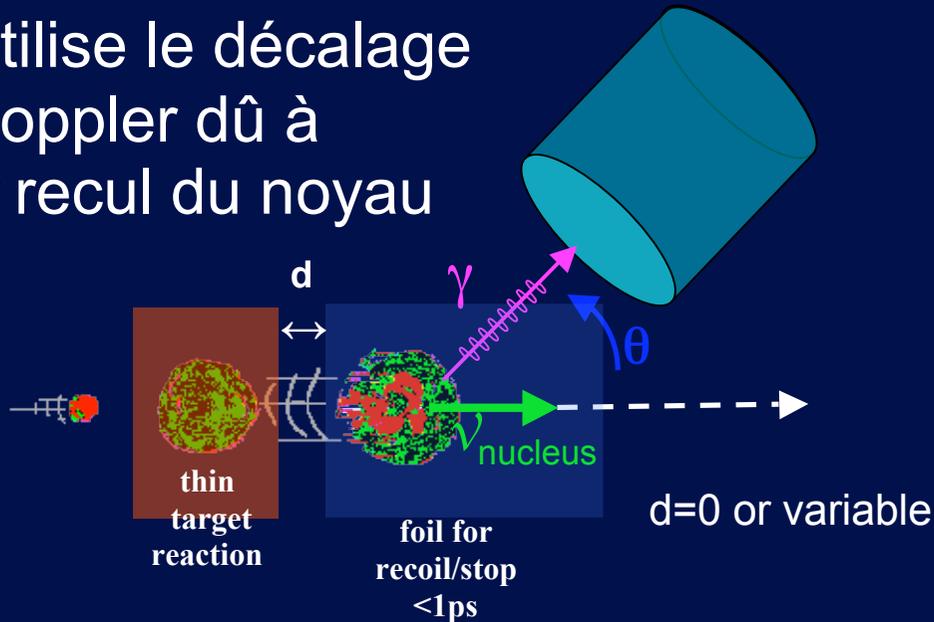
Rq: Mesure indirecte \equiv par bilan de réaction $A + a \rightarrow b + B$ ou décroissance Père \rightarrow Fils + particule

$$Q = M_A + M_a - M_b - M_B \text{ ou } Q = M_{\text{Père}} - \text{Masse}_{\text{Fils}} - \text{Masse}_{\text{part.émise}}$$

Mesure de durées de vie d'états nucléaires

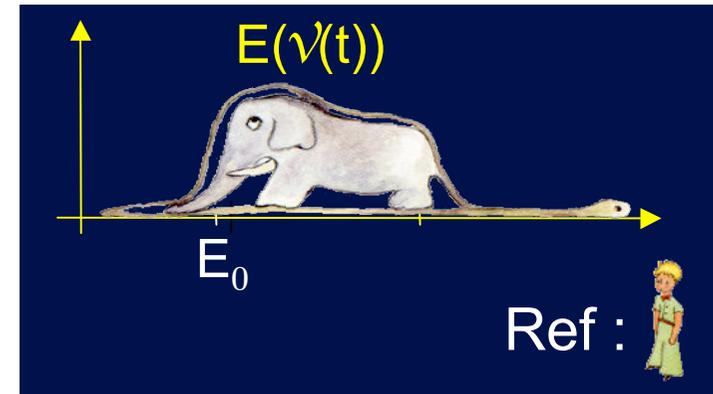
Mesure indirecte de durée de vie (pas une mesure de durée)

Utilise le décalage
Doppler dû à
 v recul du noyau



Recul dans support épais (DSAM)
 v devient $v(t)$ avec $v(t) \searrow$ quand $t \nearrow$
 $\Rightarrow E_\gamma \rightarrow E(v(t))$: "pic" complexe

$$E_{\text{mes.}} = E_\gamma \left(1 + \frac{v_{\text{nucleus}}}{c} \cos\theta\right)$$

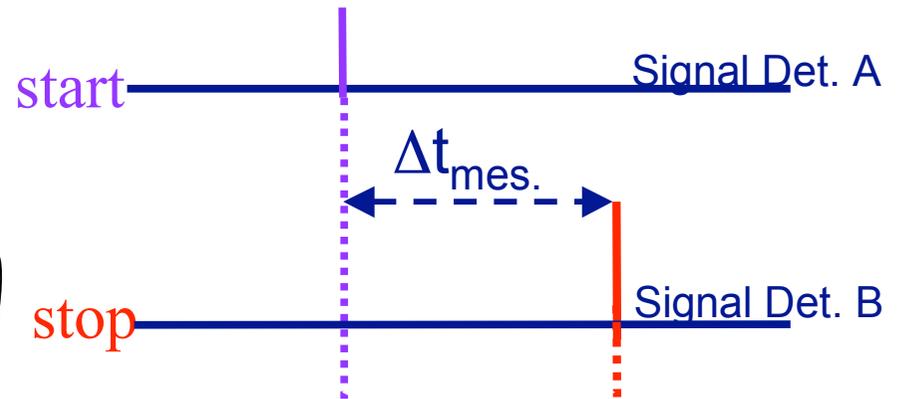
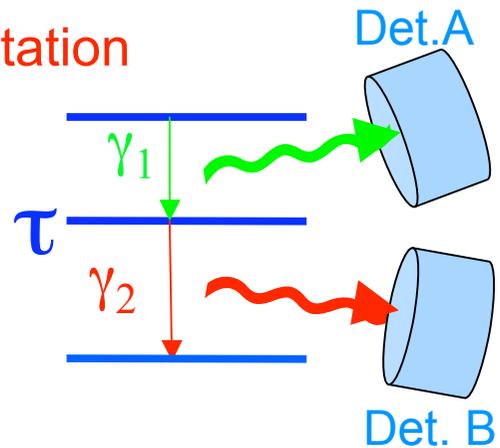


τ à partir de $E(v(t))$
 \Leftrightarrow
Resolution Energie

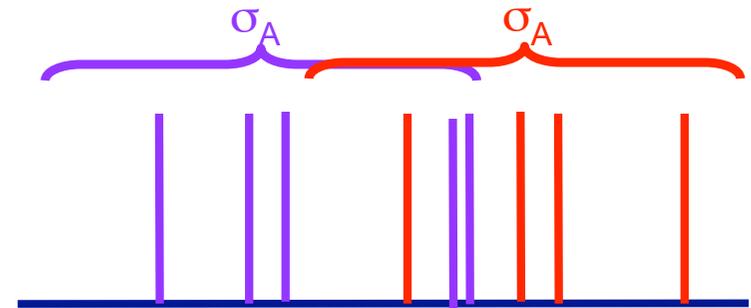
Pas sur toutes installations:
 \Rightarrow faisceau accélérés (noyau en vol) ...

Mesure directe de durée de vie:

Approx: 1 désexcitation
 \Rightarrow tjrs Δt



-  - Un événement pas suffisant (bruit)
- Passer $t \leftrightarrow$ 'top' n'existe pas ($t \pm \sigma$)



$\Rightarrow \Delta t_{\text{limit}} \gtrsim$ Résolution temp.
 \Rightarrow très petite Résolution temp.

Fin approx.:

-  $\tau \Rightarrow$ distribution Δt , vers les longs temps ($e^{-t/\tau}$),
 dont on mesure la pente

$\tau_{\text{limit}} \lesssim$ Résolution temporelle

LaBr3 vs Ge

GOOD NOT SO GOOD	Ge (3"X3")	LaBr3 (3"x3")
type	Semiconducteur: $\gamma > \text{Ne}^-$	Scintillateur: $\gamma > N(h\nu)$ \Rightarrow besoin PMT
Working conditions	froid: 77°K \Rightarrow cryostat Azote	Conditions ambiantes \Rightarrow dispositif léger et portable
Energy range and resolution	keV \nearrow MeV 1% \searrow 1‰	keV \nearrow MeV 20% \searrow 3%
Eff _{abs} @1" [1] (Eff _{rel} @1,33MeV)	$10^{-1} \searrow 2 \cdot 10^{-2}$ (75% NaI (3x3))	$2 \cdot 10^{-1} \searrow 5 \cdot 10^{-2}$ (143% NaI(3x3)@1,33MeV)
Time resp. Resolution	$\sim 250\text{ns}$ (temps montée) 20ns \searrow 5ns [2]	16ns (temps scint.) 200ps -500ps@511KeV [3,4]

[1] J. Kiener, Geant simulation and real data, private comm.

[2] Coaxial Eurogam detectors (Beausang, et al. NIM A 313 (1992) 37

[3] Technical Note 2007, Saint Gobain

[4] Moszynski et al., NIMA 567 (2006)

Fast Timing \Leftrightarrow LaBr3 ?...

Le Top 4 des scintillateurs en structure nucléaire

Scintillator	Light Yield (photons/keV)	Decay time t(ns)	F. O. M. $\sqrt{t/LY}$	Wavelength of maximum emission λ_m (nm)	Refractive index at λ_m	Density (g/cm ³)	Thickness (cm) for 50% attenuation (662keV)
NaI(Tl)	38	250	2.6	415	1.85	3.67	2.5
BrilLanCe® 380	63	16	0.5	380	~1.9	5.29	1.8
BaF2	1.8	0.7	0.6	~210	1.54	4.88	1.9
BGO	9	300	5.8	480	2.15	7.13	1.0

N.B: Ge 300

From Saint Gobain Crystals

LaBr3: 1^{er} F.O.M (2nd, 1st lumière (E res.))
 BaF2: 2th (1st 4th)
 Na(I): 3rd (3rd 2th)
 BGO: 4th (4th 3rd)

LaBr3 assez récent:

E.V.D. Van Loef *et al.*, APL 77 (2000) 1467

Nécessite de PM adaptés

1- Conversion: Eff. Quantique (QE)

$$\text{Cathode : } N_{1(e^-)} < N_{0(\text{photons})}$$

2- Collection: eff. collection ϵ_c

$$\text{@1}^{\text{ère}} \text{ dynode } N_2 < N_C$$

3- Multiplication avec gain: δ/dynode

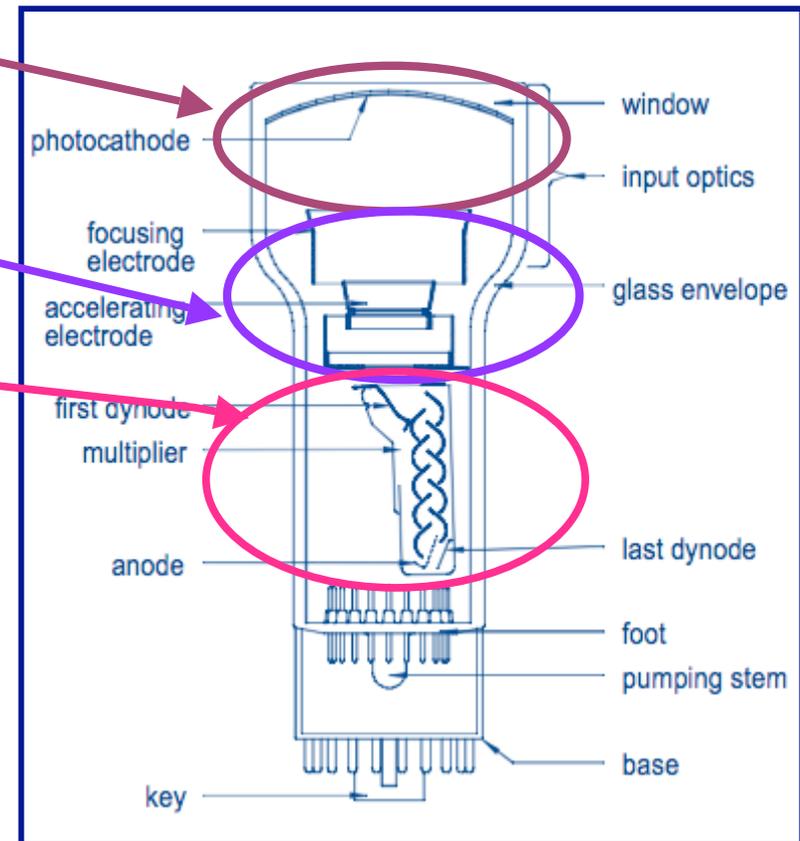
$$\text{@dernière dynode: } N_3 \gg N_2$$

Mais

Si $N_3 \nearrow$ (résolution $E \sim 1/\sqrt{N_3} \searrow$)
 qd QE \nearrow , # de dynodes \nearrow , δ (HV), ϵ_c

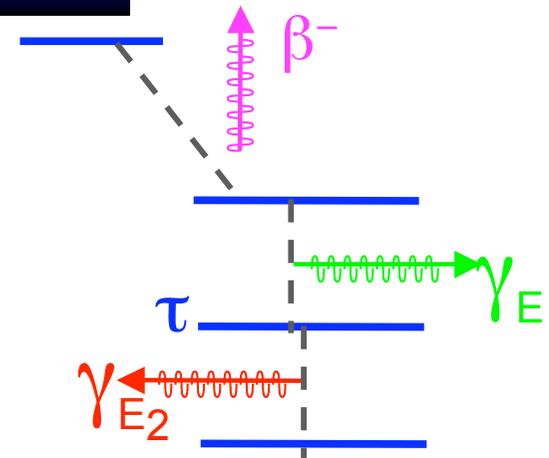
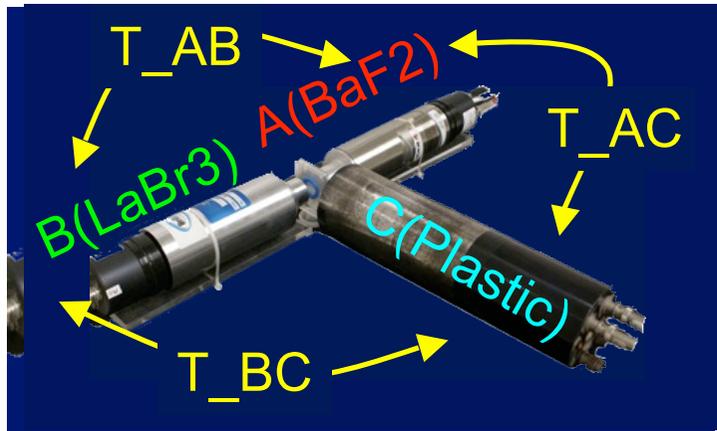
$\Delta t \nearrow$ qd # dynodes, ϵ_c , $\varnothing \nearrow$:

Plus de trajectoires différentes \Rightarrow dispersion de vitesses
 \Rightarrow dispersion temporelle



PMT "rapide" \Leftrightarrow compromis délicats

Le Fast-timing pour Alto configuration β^-



Monde analogique:

Aux 3 (E,tops) signaux:

On ajoute 3 Δt :

Signaux de différences 'tops'

Traîtés comme une énergie

(Temps \rightarrow Amplitude)



Monde digital:

acquisition

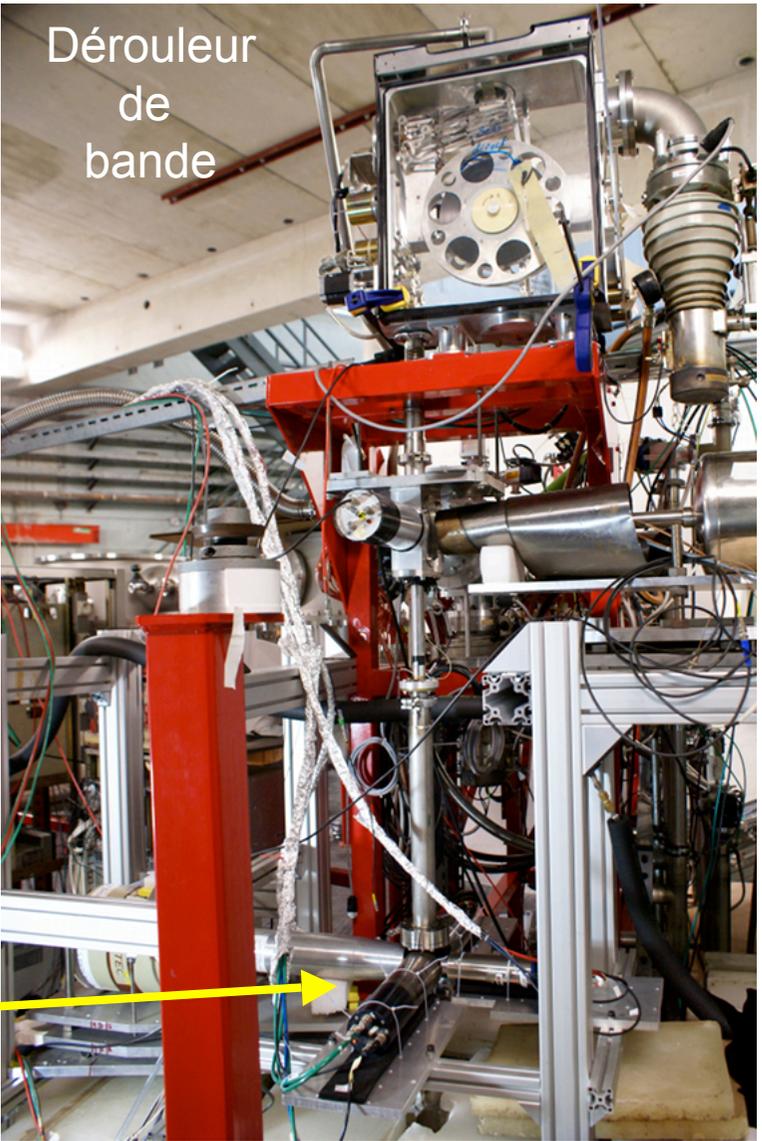
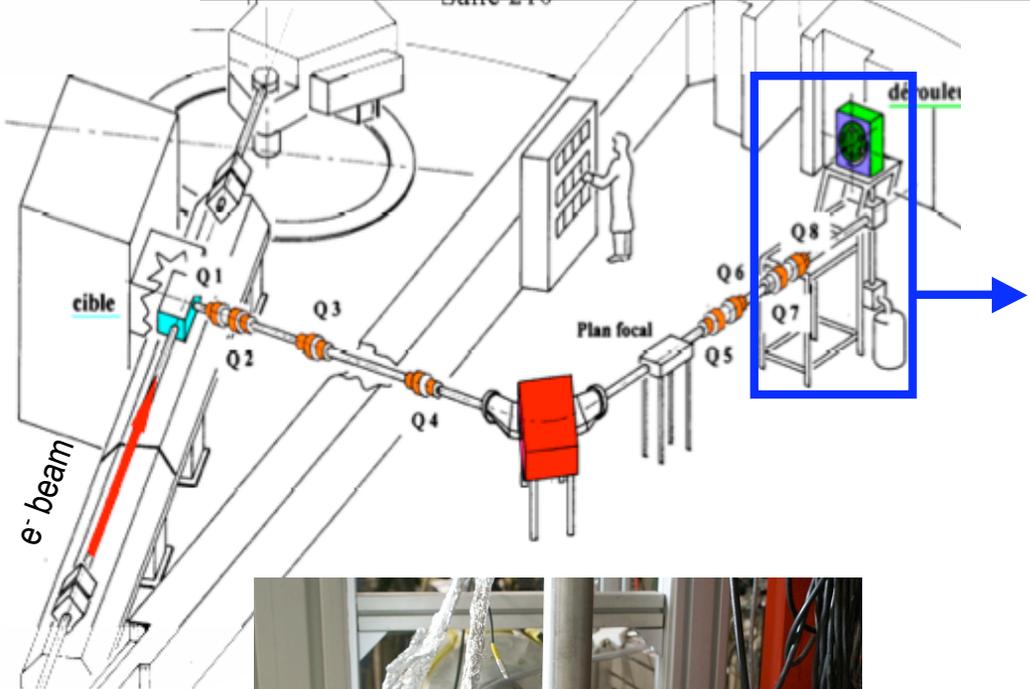
Narval/COMET:

étiquetage temporel mais

avec pas numérique 400ps

(trop long)

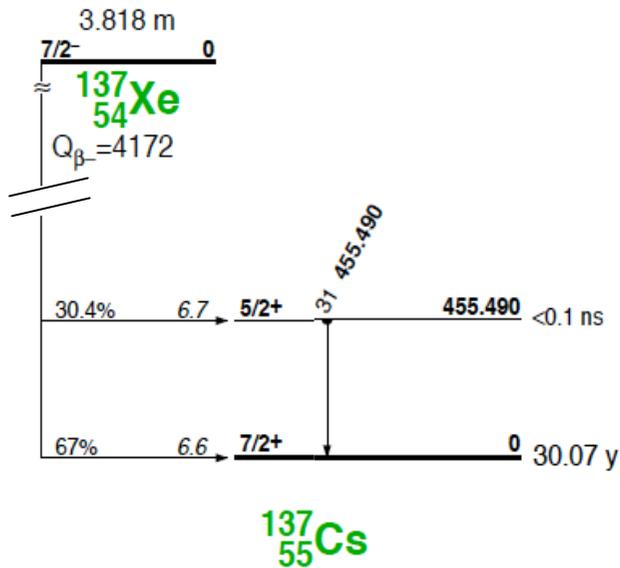
Test à pré-Alto (pas encore intensité tot)



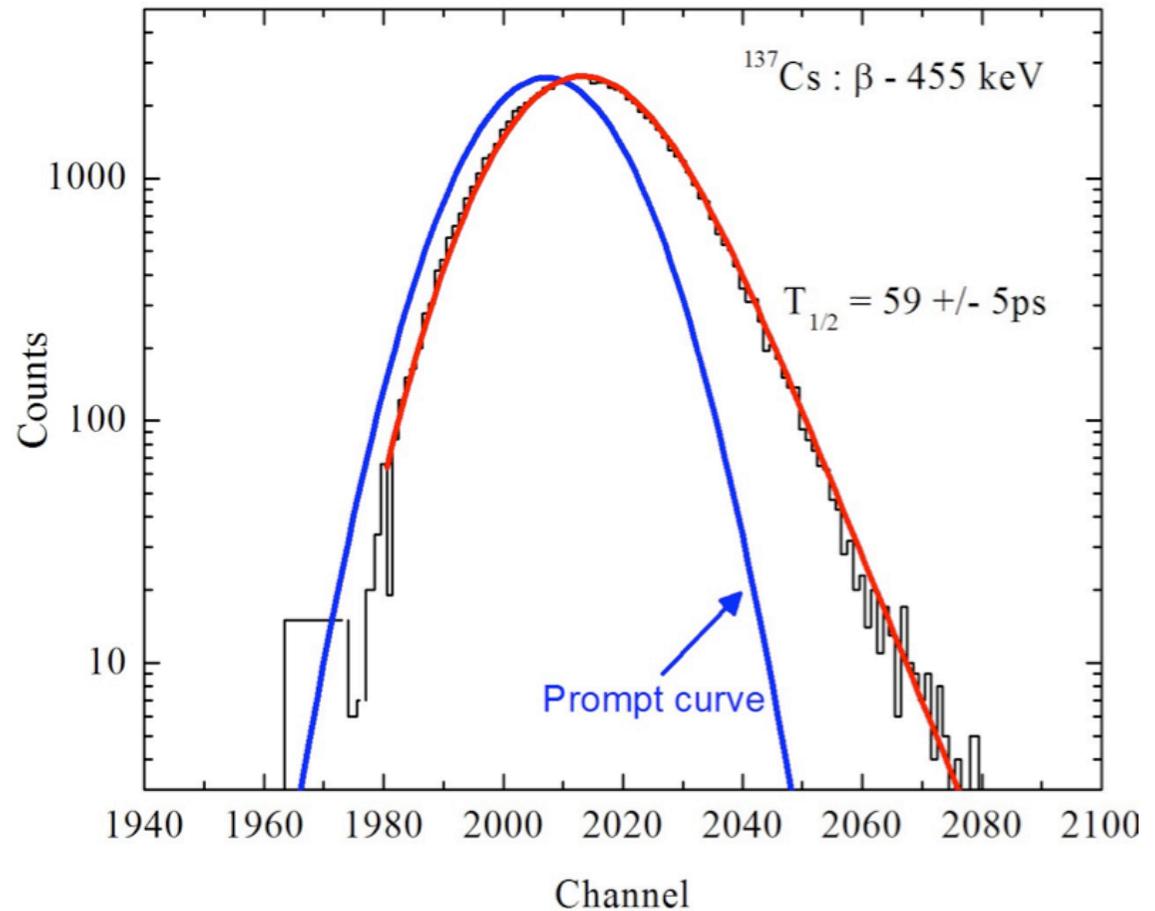
4 detecteurs en géométrie proche LaBr3 (1"x10mm), BaF2, Pilout U and Ge

Exemple de Résultat:

^{137}Xe synthétisé,
décroît vers



Un état excité principalement
(et directement) alimenté :
Triple coïncidences :
 β (start) , γ (stop), $T_{\text{start-stop}}$



B. Roussière et al., Rapport Activités IPNO 2010, et soumis

I. Deloncle, Fréjus 2008

Fin

Merci à vous tous et à
tous les contributeurs du WEB....